



UNIVERSIDAD DE A CORUÑA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Programa de Doctorado: Ingeniería Civil

Tesis Doctoral

**Análisis y desarrollo de las adaptaciones tecnológicas
en infraestructura y vehículos para la implantación
de un sistema de tranvitrén sobre líneas de
Ferrocarriles de Vía Estrecha (FEVE)**



Autora:
Margarita Novales Ordax

Director:
Miguel D. Rodríguez Bugarín

A Coruña, Septiembre de 2004

Reunido el Tribunal para la lectura y
defensa de la tesis doctoral de Dña Margarita
Novales Ordoñez, se le ha otorgado la califi-
cación de sobresaliente cum laude por
Unanimidad,


Dejar constancia que se ha desarrollado el labor
de Presidente D. José M^e Menéndez Martínez
en sustitución de D. José Manuel García Díez-
de-Villagas, quien no ha asistido por
enfermedad. El 1^{er} suplente, D. Julian Dorado
de la Calle pasó a ser 1^{er} vocal.


En la Coruña, a 31 de Enero de 2005



Fdo: José M^e Menéndez
Presidente


Fdo: D. Julian Dorado
Vocal


Fdo: D. Andrés Mouren
Vocal


Fdo: D. Antonio Santalín
Vocal


Fdo: José M^e Díaz
Secretario


Fdo: Margarita Novales
Doctorando



UNIVERSIDAD DE A CORUÑA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Programa de Doctorado: Ingeniería Civil

Tesis Doctoral

**Análisis y desarrollo de las adaptaciones tecnológicas
en infraestructura y vehículos para la implantación
de un sistema de tranvitrén sobre líneas de
Ferrocarriles de Vía Estrecha (FEVE)**

Autora:

Margarita Novales Ordax

Director:

Miguel D. Rodríguez Bugarín

A Coruña, Septiembre de 2004

RESUMEN

Los sistemas de tranvitrén (*tram-train*) constituyen una versión avanzada de los sistemas de metro ligero, en el sentido de que, utilizando vehículos similares, con ciertas modificaciones, se puede realizar el transporte metropolitano usando tanto las redes tranviarias típicas de las ciudades como las redes ferroviarias convencionales, sin necesidad de eliminar de ninguna de ellas el tráfico para el que han sido concebidas originariamente (tranviario o ferroviario, respectivamente).

En esta Tesis se realiza, en una primera parte, un estudio de los sistemas de tranvitrén existentes en la actualidad, o en fase de estudio o proyecto, en diversas ciudades europeas, prestando especial atención a los problemas técnicos que se presentan en la implantación de este tipo de sistemas, y la forma de resolverlos en las explotaciones consideradas.

En una segunda fase, se aborda el estudio de los problemas técnicos concretos que conllevaría la implantación de este tipo de sistemas en España, utilizando las líneas ferroviarias de FEVE (Ferrocarriles de Vía Estrecha). Estos problemas, son, principalmente, los siguientes: resistencia estructural de la caja; alimentación eléctrica del vehículo; sistemas de seguridad y comunicaciones; acceso de viajeros; perfil de llanta; y gálibo. A cada uno de estos problemas se le dedica un capítulo, en el que se plantea su origen, las diversas opciones de solución que resulten técnicamente viables, y se destacan aquellas que resultan más apropiadas para el caso concreto que se trata en esta Tesis.

El capítulo relativo al perfil de llanta constituye una excepción a este planteamiento genérico, dado que la solución dependerá de las líneas tranviarias y ferroviarias concretas que se pretenda utilizar para la explotación considerada. Es por ello que, en dicho capítulo, se ha procedido al establecimiento de una metodología de aplicación genérica para la obtención de un perfil de llanta mejorado para la circulación combinada sobre dos tipos de redes diferentes (que, en el caso tratado en esta Tesis serán la tranviaria convencional y la ferroviaria de FEVE).

ABSTRACT

Tram-train systems are an advanced version of light rail systems in the way that, using the same kind of vehicles but slightly modified, it is possible to carry out metropolitan transit using both the typical tram networks and the conventional railways ones, without the need to terminate in any of them the traffic for which they were originally conceived.

In the first part of this Thesis, a study of the existing and projected tram-train systems in several European cities is carried out. Special attention has been paid to the technical problems found in the introduction of this kind of systems and the solutions to these problems used in the considered networks.

In the second part, the study of the specific technical problems implied in the introduction of this kind of system in Spain, using the railway lines of FEVE (Spanish Narrow Gauge Railways) is accomplished. The typical problems found are the following: box crashworthiness, vehicle's electricity supply, safety and communication systems, passenger access, wheel profile and vehicle clearance. A chapter has been devoted to every one of these problems, in which the origin of the problem and the different technically feasible solutions are exposed; finally the most adequate solutions for the specific case studied in this Thesis are highlighted.

The chapter related to the wheel profile is an exception in this generic approach because the solution depends on the particular tram and railway networks that are to use in the particular case. For these reason, in that chapter, a general methodology for obtaining an improved wheel profile for the combined running over two different kind of networks (that, in the case solved in this Thesis are a conventional tram one and the FEVE railway network).

AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis nace a partir del Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico TRA99-0291 *Estudio sobre la compatibilidad de un sistema de metro ligero con la red de metropolitano y cercanías de Madrid*, financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología. El desarrollo de dicho proyecto no habría sido posible sin la entusiasta colaboración de diversas personas involucradas en el mismo, como son: Carlos Cristóbal, Jefe del Área de Estudios y Planificación del Consorcio Regional de Transportes de Madrid; Julián Sastre, Jefe del Grupo de Planificación del Transporte, y Joaquín Botella, Director de Proyecto del Sector de Ingeniería Civil, ambos de la empresa SENER Ingeniería y Sistemas S.A.; Jesús María Guerra, Jefe de Oficina Técnica, y José Joaquín Peña, Jefe del Departamento Comercial, ambos de la empresa CAF (Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles, S.A.). Es por ello que quiero aprovechar estas líneas para mostrar mi más sincero agradecimiento a todos ellos.

Una vez finalizado dicho trabajo, y como continuación del mismo, se inicia el proyecto *Estudio de las modificaciones necesarias en la interacción entre la infraestructura y el material móvil para conseguir la interoperabilidad entre las redes ferroviarias convencionales y urbanas. Directrices para la futura normalización de las redes y material móvil para alcanzar dicha interoperabilidad*. Dicho proyecto, financiado por el Ministerio de Fomento, y todavía en ejecución, da lugar a la redacción de la presente Tesis.

Por otra parte, el desarrollo de esta Tesis no hubiera sido posible sin la colaboración y la información aportada por gran número de personas, como son, entre otras: Jesús Hallado, Director de Infraestructuras de FEVE; Ignacio de Ribera, Gerente de Fabricación de la Dirección de Material de Renfe; Trevor Griffin, Director del Grupo de Metro Ligero de AEA Technology Rail; Stefaan Willequet, Director del Departamento de Programas y Estudios de la UITP (Union Internationale des Transports Publics); José Jesús Fraile, Catedrático del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Madrid; Frédéric Persat, Ingeniero del Departamento de Sistemas de Transporte de Systra; Mats Berg, Profesor de la División de Tecnología Ferroviaria del KTH (Real Instituto de Tecnología de Estocolmo); Concha Ortega, Ingeniera de IDOM; Juanjo Olaizola, Director del Museo Vasco del Ferrocarril; Ignacio Barrón, representante de Renfe en la UIC (Union Internationale des Chemins de Fer); Rudolf Rotgans, Jefe de Infraestructura de Rhätische Bahn; Massimo Lenti, Jefe del Departamento Técnico de ALSTOM Ferroviaria; y Javier Abaitua, Jefe de Proyecto de la División de Transporte de Siemens. Sirvan, también, estas líneas, para expresar mi agradecimiento a todos ellos.

Ha sido fundamental, también, la colaboración de Ingemar Persson, de la empresa DEsolver, que ha proporcionado, en numerosas ocasiones, su opinión como experto acerca de diversos temas clave de esta Tesis. Por otra parte, debo agradecer su paciencia y dedicación para la resolución de todas las dudas y problemas que han surgido en la utilización del programa GENSYS.

También ha sido fundamental la colaboración de Alfonso Orro, que a pesar de sus múltiples ocupaciones, siempre ha estado a mi disposición para la resolución de dudas de diversa índole (desde temas informáticos a cuestiones de fondo relacionadas con el planteamiento de la Tesis), así como para darme ánimos en los momentos más duros.

Asimismo, me gustaría utilizar estas líneas para expresar mi agradecimiento al Director de esta Tesis, Miguel R. Bugarín, sin cuyo apoyo, paciencia y dedicación no habría sido capaz de realizarla. A pesar de los numerosos contratiempos que ha vivido en los últimos años, siempre me ha dedicado mucho más tiempo del que disponía, y no ha escatimado esfuerzos para resolver los temas que a mí se me escapaban. Dudo que en ninguna otra Tesis la colaboración del Director haya sido tan importante como en la que aquí se presenta, y por ello, siempre estaré en deuda con él.

Finalmente, querría agradecer su apoyo a todas las personas que, de una forma u otra, han estado conmigo en estos años, y entre ellas a Pay, que por su cercanía ha sufrido más que otros los cambios de humor que me produce la tensión; a Nuria, que siempre me saca a flote, aunque sólo sea distrayéndome; y a mis padres, que han sobrellevado mis angustias sin pedir explicaciones. Y, por supuesto, a Jorge, que ha soportado tantos momentos de desánimo y tantas ausencias sin perder la paciencia ni hacer un reproche.

NOMENCLATURA

AG	Algoritmo Genético
Y	Componente transversal a la vía de la fuerza de contacto rueda-carril. Puede tener el subíndice r o l, en función de que se refiera a la rueda derecha o a la izquierda
Q	Componente vertical de la fuerza de contacto rueda-carril. Puede tener el subíndice r o l, en función de que se refiera a la rueda derecha o a la izquierda
γ	Ángulo entre el plano de contacto rueda-carril y el eje y transversal a la vía. Puede tener el subíndice r o l, en función de que se refiera a la rueda derecha o a la izquierda
F_{η}	Componente de la fuerza de contacto rueda-carril, en la dirección del plano de contacto. Puede tener el subíndice r o l, en función de que se refiera a la rueda derecha o a la izquierda
N	Componente de la fuerza de contacto rueda-carril, en la dirección perpendicular al plano de contacto. Puede tener el subíndice r o l, en función de que se refiera a la rueda derecha o a la izquierda
β	Ángulo de inclinación de la pestaña de la rueda respecto al plano horizontal
μ	Coefficiente de rozamiento
Y/Q_{lim}	Valor límite del cociente Y/Q (fuerzas transversales entre fuerzas verticales en el punto de contacto rueda-carril)
$Y/Q_{ij}(x)$	Distribución de valores del cociente Y/Q para una rueda dada para un recorrido determinado, siendo x la posición sobre la vía. El subíndice i se refiere al eje de que se trata, pudiendo valer 11 (primer eje del primer bogie), 12 (segundo eje del primer bogie), 21 (primer eje del segundo bogie) o 22 (segundo eje del segundo bogie). El subíndice j se refiere a la rueda de que se trata, pudiendo adoptar el valor l si es la rueda izquierda, o r si es la rueda derecha.
$Y/Q_{ij,2m}(x)$	Distribución de valores del cociente Y/Q filtrados en tramos de 2 m de longitud, para una rueda dada para un recorrido determinado. Los subíndices tienen el mismo significado que en el caso anterior.
$Y/Q_{ij,2mMAX}$	Valor máximo de la distribución de valores de Y/Q filtrados en tramos de 2 m de longitud, para una rueda dada. Los subíndices tienen el mismo significado que en el caso anterior.
Y/Q_{max}	Valor máximo de los valores de Y/Q filtrados en tramos de 2 m de longitud, para todas las ruedas del vehículo
I_{YQ}	Índice parcial relacionado con el cociente de fuerzas Y/Q, y, por tanto, con el riesgo de descarrilamiento
$(F_{\xi}(x))_{a,ij}$	Fuerza de pseudodeslizamiento en la dirección longitudinal de la elipse de contacto. El subíndice a puede adoptar el valor de banda, o pestaña, según la zona de la rueda en que se esté produciendo el contacto. Los subíndices i y j tienen el mismo significado que en los

	casos anteriores
$(F_{\eta}(x))_{a,ij}$	Fuerza de pseudodeslizamiento en la dirección transversal de la elipse de contacto. Los subíndices a, i y j tienen el mismo significado que en el caso anterior
$(v(x))_{a,ij}$	Pseudodeslizamiento en la dirección longitudinal de la elipse de contacto. Los subíndices a, i y j tienen el mismo significado que en los casos anteriores
$(v_{\eta}(x))_{a,ij}$	Pseudodeslizamiento en la dirección transversal de la elipse de contacto. Los subíndices a, i y j tienen el mismo significado que en los casos anteriores
$(M_{\zeta}(x))_{a,ij}$	Momento de pseudodeslizamiento en dirección perpendicular a la elipse de contacto. Los subíndices a, i y j tienen el mismo significado que en los casos anteriores
$(\phi(x))_{a,ij}$	Pseudodeslizamiento de giro en dirección perpendicular a la elipse de contacto. Los subíndices a, i y j tienen el mismo significado que en los casos anteriores
$E_{ij}(x)$	Disipación de energía de desgaste en una determinada rueda en una determinada posición del recorrido (x). Los subíndices i y j tienen el mismo significado que en los casos anteriores
E_{Total}	Disipación de energía de desgaste total del vehículo, suma de las medias de $E_{ij}(x)$ para las ocho ruedas del vehículo
$I_{Desgaste}$	Índice parcial relacionado con la disipación de energía de desgaste a lo largo del perfil de rueda al circular por la vía
$\sigma_{ij}(x)$	Tensión de contacto rueda-carril en una determinada rueda en una determinada posición del recorrido (x). En caso de contacto doble se toma el valor mayor de entre los dos puntos de contacto. Los subíndices i y j tienen el mismo significado que en los casos anteriores
s	Desviación típica de la distribución de una determinada variable
σ_{ijmax}	Valor máximo de la distribución de tensión de contacto rueda-carril en una determinada rueda para un recorrido concreto. Se calcula como el valor medio más tres veces la desviación típica de $\sigma_{ij}(x)$
$I_{Tensión}$	Índice parcial relacionado con las tensiones de contacto rueda-carril que se producen al circular por la vía
I_{TF}	Índice total ferroviario, obtenido mediante la simulación sobre vía ferroviaria
I_{TT}	Índice total tranviario, obtenido mediante la simulación sobre vía tranviaria
I_{TP}	Índice total ponderado, obtenido combinando I_{TF} e I_{TT}
x	Eje longitudinal de la vía
y	Eje transversal de la vía

z	Eje vertical de la vía, positivo hacia abajo
l_c	Longitud de caja del vehículo
b	Ancho de caja del vehículo
c	Altura de caja del vehículo
I_x	Momento de inercia respecto al eje x, longitudinal
I_y	Momento de inercia respecto al eje y, transversal
I_z	Momento de inercia respecto al eje z, vertical
k_{wr}	Rigidez del contacto rueda-carril
c_{wr}	Amortiguación del contacto rueda-carril
q_R	Distancia horizontal entre dos puntos de la pestaña: aquél situado sobre la cara activa de la pestaña, 10 mm por debajo del círculo medio de rodadura; y aquél situado 2 mm por encima del vértice de la pestaña de la rueda
r_0	Radio de la rueda en el círculo medio de rodadura
r_1, r_2	Radios de las ruedas izquierda y derecha respectivamente, en los puntos de contacto, para un desplazamiento transversal y del eje respecto a la posición centrada sobre la vía
γ_e	Conicidad equivalente
h	Entrecalle carril-contracarril
A_R	Distancia entre caras internas de las ruedas
D	Espesor de la pestaña, medido 10 mm por debajo del círculo de rodadura
r	Espesor de recrecimiento del perfil de rueda
h_a	Altura a partir de la cual el perfil de rueda tiene el ancho total incluyendo el recrecimiento establecido
h_r	Altura a partir de la cual empieza el acuerdo entre el ancho de rueda sin recrecer y el recrecido
i	Cada uno de los individuos de cada generación (varía de 1 a 10)
i_{loop}	Número de generación dentro del proceso de evolución del AG
i_{min1}	Posición del mejor individuo de cada generación
i_{min2}	Posición del segundo mejor individuo de cada generación
i_{min3}	Posición del tercer mejor individuo de cada generación
i_{min4}	Posición del cuarto mejor individuo de cada generación
I_{TPmin1}	Valor del I_{TP} del mejor individuo de cada generación
I_{TPmin2}	Valor del I_{TP} del segundo mejor individuo de cada generación
I_{TPmin3}	Valor del I_{TP} del tercer mejor individuo de cada generación
I_{TPmin4}	Valor del I_{TP} del cuarto mejor individuo de cada generación

Indices(i, j)	Matriz que contiene los valores de I_{TP} del los individuos de cada generación
i_{max1}	Posición del peor perfil de la generación anterior
I_{TPmax1}	Valor del I_{TP} del peor individuo de la generación anterior
ΔI_{TP}	Diferencia del valor del I_{TP} del peor y el mejor individuo de la generación anterior
i_{max2}	Posición del segundo peor perfil de la generación anterior
I_{TPmax2}	Valor del I_{TP} del segundo peor perfil de la generación anterior
Ad_i	Indica la bondad o adaptación del individuo i de una generación con respecto a los criterios establecidos. Su valor es mayor cuanto mejor es el perfil (individuo) considerado
Sum_{Ad}	Suma de los valores Ad_i de todos los individuos de una generación
Rul_j	Establece los sectores de la ruleta sesgada para los que resultará elegido el individuo j de una generación (su valor varía entre 0 y 1)
ipa_j	Individuo de la generación anterior que se va a repetir en la posición j de la generación que se está creando
$ipa_{ii,i}$	Individuos de la generación anterior que se aparearán para obtener el individuo i de la generación que se está creando. ii puede tener el valor 1 o 2, dado que hay dos padres para cada individuo
i_{com}	Posición dentro del vector cuarta derivada del perfil de rueda en el que comienza a aplicarse la mutación
i_{long}	Longitud del cada uno de los tramos de la mutación
$ampl$	Amplitud de cada uno de los pulsos de la mutación que se aplica a la cuarta derivada
$muta$	Variable que controla la dimensión de la mutación a aplicar en la generación siguiente
$muta2$	Variable que controla la necesidad o no de aplicar una mutación en la generación siguiente
v	Velocidad de circulación (expresada en m/s)
V	Velocidad de circulación (expresada en km/h)
h	Peralte de una curva
g	Aceleración de la gravedad
a	Distancia entre ejes de carriles
A_{CSC}	Aceleración centrífuga sin compensar
R	Radio de curva (en m)
L	Longitud de alineación
L_{min}	Longitud mínima de alineación
L_{max}	Longitud máxima de alineación

R_i	Radio de curva de cada una de las curvas consideradas en un intervalo dado
R_m	Radio medio de curva de un intervalo dado
L_i	Longitud de curva de cada una de las curvas consideradas en un intervalo dado
$L_{CT,i}$	Longitud de curva de transición de la curva i del intervalo dado
$L_{CC,i}$	Longitud de curva circular de la curva i del intervalo dado
L_m	Longitud media de curva de un intervalo dado
h_i	Peralte de cada una de las curvas consideradas en un intervalo dado
L_i	Longitud total de alineaciones curvas englobadas dentro del mismo intervalo
L_{total}	Longitud total de las curvas de un trazado estudiado
L^*_{total}	Longitud total de las curvas consideradas de un trazado estudiado
$P_{sobretotal}$	Porcentaje que representa L_i sobre la longitud total de las curvas del trazado estudiado
$P_{consideradas}$	Porcentaje que representa L_i sobre la longitud total de las curvas consideradas del trazado estudiado
N_i	Número de alineaciones que le corresponde a cada intervalo de curvas dentro del trazado característico
$L_{m,1}$	Longitud media de las curvas del intervalo al que se le asigna una única alineación dentro del trazado característico
$L_{m,i}$	Longitud media de las curvas del intervalo considerado, i
TA_i	Cada uno de los tipos de accidente que se pueden producir
$C(TA_i)$	Criticidad del tipo de accidente i
P_i	Probabilidad de ocurrencia del tipo de accidente i
G_i	Gravedad del tipo de accidente i (expresado en número de víctimas)

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	55
1. EL AUMENTO DE LA POBLACIÓN MUNDIAL Y EL CRECIMIENTO DE LAS ÁREAS METROPOLITANAS	57
2. AUMENTO DE MOVILIDAD Y CONGESTIÓN EN LAS CIUDADES	58
3. EL CONCEPTO DE TRANSPORTE SOSTENIBLE	61
4. EFECTOS ADVERSOS DE LA NO SOSTENIBILIDAD DEL CONJUNTO DEL TRANSPORTE	62
4.1. Accidentes	62
4.2. Ruido	63
4.3. Contaminación atmosférica	63
4.4. Efectos sociales	64
4.5. Espacio en las ciudades	65
4.6. Sensibilidad de la opinión pública europea respecto al medio ambiente	66
5. OBJETIVO: HACIA UN TRANSPORTE SOSTENIBLE	66
6. EL TRANVÍA/METRO LIGERO COMO SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS PLANTEADOS	70
REFERENCIAS	76

CAPÍTULO 2: EL TRANVITRÉN	79
1. INTRODUCCIÓN	81
2. ¿QUÉ ES EL TRANVITRÉN?	82
3. TÉRMINOS TRANVITRÉN Y TREN-TRANVÍA	84
4. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE TRANVITRÉN	85
4.1. Ventajas económicas	85
4.2. Ventajas para los usuarios	85
4.3. Ventajas para la sociedad	86
REFERENCIAS	88

CAPÍTULO 3: EXPERIENCIAS INTERNACIONALES	89
1. INTRODUCCIÓN	91

2. SISTEMAS DE TRANVITRÉN EN ALEMANIA	91
2.1. Karlsruhe	91
2.1.1. Introducción	91
2.1.2. Situación previa a la aparición del tranvitrén	91
2.1.3. Motivación de la aparición del tranvitrén	92
2.1.4. Desarrollo del proyecto	93
2.1.5. Explotación	97
2.1.6. Resultados obtenidos	98
2.1.7. Financiación	99
2.1.7.1. Marco normativo	99
2.1.7.2. Financiación del tranvitrén de Karlsruhe	100
2.1.8. Vehículo	101
2.2. Saarbrücken	103
2.2.1. Introducción	103
2.2.2. Desarrollo del proyecto	103
2.2.2.1. Motivación	103
2.2.2.2. Principales etapas de realización del proyecto	105
2.2.3. Descripción de la línea	107
2.2.4. Explotación	110
2.2.5. Resultados	111
2.2.6. Futuras extensiones previstas	111
2.2.7. Financiación	112
2.2.8. Vehículo	112
2.3. Kassel	113
2.3.1. Introducción	113
2.3.2. La red tranviaria	114
2.3.3. La red Regiotram	115
2.3.4. Material móvil	117
2.4. Braunschweig	118
2.4.1. Introducción	118
2.4.2. El RSB	119
2.4.3. Explotación	121
2.5. Heilbronn	121
2.5.1. Introducción	121
2.5.2. La red	122
2.5.3. Explotación	122
2.5.4. Costes y financiación	122
3. SISTEMAS DE TRANVITRÉN EN FRANCIA	123
3.1. Tranvitrén Genève – Bellegarde	124
3.1.1. Introducción	124
3.1.2. Servicio de tranvitrén	125
3.1.3. Vehículo	126
3.2. Tranvitrén Aulnay-sous-Bois – Bondy	126

3.3. Tranvitrén Strasbourg – Bruche – Piémont	128
3.3.1. Introducción	128
3.3.2. Descripción del proyecto	129
3.3.3. Explotación	130
3.3.4. La S.I.B.S.	132
3.3.5. Costes	132
3.3.6. Resultados	133
3.4. Otros proyectos de tranvitrén en Francia	133
3.4.1. Mulhouse	133
3.4.2. Grenoble	134
3.5. Material móvil del tranvitrén francés	136
4. EL TRANVITRÉN EN EL REINO UNIDO	137
4.1. Sunderland Metro	138
4.1.1. Introducción	138
4.1.2. La línea	139
4.1.3. Explotación	140
4.1.4. Costes y financiación	140
4.2. Otras experiencias inglesas	141
4.2.1. Nottingham	141
4.2.2. Manchester	141
4.2.3. Bristol	142
5. EL TRANVITRÉN EN ESPAÑA	143
6. TABLAS RESUMEN	144
7. EL TREN-TRANVÍA DE ZWICKAU	147
REFERENCIAS	150
PÁGINAS WEB DE INTERÉS	152

CAPÍTULO 4: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 155

1. INTRODUCCIÓN	157
2. MOTIVACIÓN DE LA ELECCIÓN DE LAS LÍNEAS FERROVIARIAS DE FEVE	157
2.1. Ancho de vía	157
2.2. Situación de las líneas de FEVE en el norte de España	159
3. OBJETIVOS DE LA TESIS	161
4. PRINCIPALES CUESTIONES TÉCNICAS A ANALIZAR	161
4.1. Resistencia estructural de la caja	162

4.2. Alimentación eléctrica	163
4.3. Sistemas de seguridad y comunicaciones	164
4.4. Acceso de viajeros	165
4.5. Perfil de llanta	165
4.6. Gálibo	166
4.7. Compatibilidad de circulaciones de distintas funcionalidades	167
5. EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y SITUACIÓN ACTUAL DE LAS LÍNEAS DE ANCHO MÉTRICO EN ESPAÑA	168
5.1. Aparición de los ferrocarriles de ancho métrico en España	168
5.2. Creación de la Explotación de Ferrocarriles por el Estado, y posterior conversión en FEVE	169
5.3. Situación actual de FEVE	169
REFERENCIAS	172

CAPÍTULO 5: RESISTENCIA ESTRUCTURAL DE LA CAJA..... 173

1. INTRODUCCIÓN	175
2. RESISTENCIA ESTRUCTURAL EN EL FERROCARRIL CONVENCIONAL	175
2.1. Planteamiento general	175
2.2. Normativa	177
2.3. Proyecto SAFETRAIN	178
3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL TRANVIARIA	178
4. RESISTENCIA ESTRUCTURAL EN LOS VEHÍCULOS DE TRANVITRÉN	180
4.1. Introducción	180
4.2. Solución adoptada en otros países	180
4.2.1. Alemania	180
4.2.2. Inglaterra	181
4.2.3. Francia	182
4.3. Conclusiones de las soluciones internacionales	182
4.4. Proyecto SAFETRAM	183
4.4.1. Objetivos del proyecto SAFETRAM	183
4.4.2. Situaciones de colisión	184
4.4.3. Requisitos de diseño	184

5. RECOMENDACIONES PARA EL CASO FEVE	187
5.1. El binomio seguridad activa – seguridad pasiva	187
5.2. Aplicación del binomio seguridad activa – seguridad pasiva al caso del tranvitrén. Aumento de la seguridad activa	188
5.3. Metodología de comparación de riesgo	190
5.4. Conclusiones de aplicación en el caso FEVE	190
REFERENCIAS	192

CAPÍTULO 6: TRACCIÓN..... 195

1. INTRODUCCIÓN	197
2. SOLUCIÓN ADOPTADA EN OTROS PAÍSES	198
2.1. Alemania	199
2.1.1. Karlsruhe	199
2.1.2. Saarbrücken	200
2.1.3. Normativa alemana	201
2.2. Gran Bretaña	201
2.3. Francia	204
3. OPCIONES PARA EL CASO FEVE	205
3.1. Sistema de metro ligero en 1 500 V CC	207
3.1.1. La línea Ohtsu-Kyoto, en Japón	207
3.1.2. La línea verde del ferrocarril de Lausanne-Echallens-Bercher (LEB)	208
3.2. Vehículo bitensión 750 / 1 500 V CC	213
3.3. Vehículo de tracción híbrida (diesel-eléctrica)	215
3.4. Vehículo de propulsión diesel	217
3.5. Vehículo con acumuladores o baterías	218
3.6. Vehículo con volantes de inercia	218
3.7. Vehículo con tracción por supercondensadores (ultracapacitors)	219
3.8. Vehículos con pilas de combustible	219
3.8.1. Funcionamiento de las pilas de combustible	219
3.8.2. Posibilidades de utilización de las pilas de combustible en la tracción de los vehículos ferroviarios	220
4. CONCLUSIONES PARA LA APLICACIÓN EN EL CASO FEVE	221
REFERENCIAS	223

CAPÍTULO 7: SISTEMAS DE SEGURIDAD Y COMUNICACIONES 225

1. INTRODUCCIÓN	227
2. SISTEMAS DE SEGURIDAD FERROVIARIOS CLÁSICOS	228
3. EL CASO DE FEVE	229
4. SISTEMAS DE SEGURIDAD EN EXPLOTACIONES URBANAS DE METRO LIGERO	229
5. RECOMENDACIONES PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANVITRÉN SOBRE LAS VÍAS DE FEVE	230
REFERENCIAS	235

CAPÍTULO 8: ACCESO DE VIAJEROS 237

1. INTRODUCCIÓN	239
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	240
3. SOLUCIÓN ADOPTADA EN OTROS PAÍSES	242
3.1. Normativa alemana	242
3.2. Normativa británica	244
4. POSIBLES SOLUCIONES PARA EL CASO FEVE	246
4.1. Soluciones al problema de distancias horizontales excesivas	246
4.1.1. Soluciones mediante la actuación en la infraestructura	246
4.1.1.1. Sección con cuatro o seis carriles, de eje desviado	247
4.1.1.2. Nuevas estaciones en paralelo	249
4.1.2. Soluciones mediante la actuación en los vehículos de tranvitrén	250
4.1.2.1. Aumento del ancho de los vehículos de tranvitrén	250
4.1.2.2. Plataformas retráctiles	251
4.2. Soluciones al problema de alturas de andén diferentes	252
4.2.1. Soluciones mediante la actuación en la infraestructura	254
4.2.1.1. Utilización de andenes a doble altura	254
4.2.1.2. Rebajar la cota de la vía en las paradas de ámbito urbano	256
4.2.2. Soluciones mediante la actuación en los vehículos de tranvitrén	257
4.2.2.1. Escalones retráctiles	257
4.2.2.2. Acceso al vehículo a doble altura	259
4.3. Soluciones a los dos problemas simultáneamente	261
5. RECOMENDACIONES PARA EL CASO FEVE	261
REFERENCIAS	264

I. INTRODUCCIÓN 267

2. SOLUCIÓN ADOPTADA EN OTROS PAÍSES 271

2.1. Alemania 271

2.1.1. Karlsruhe 271

2.1.2. Saarbrücken 273

2.1.3. Normativa alemana 274

2.2. Gran Bretaña 277

2.3. Francia 278

3. POSIBLES SOLUCIONES PARA LOS PERFILES DE RUEDA Y CARRIL 282

3.1. Caso de sistema tranviario de primera implantación 283

3.2. Caso de sistema tranviario existente 283

4. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DEL PERFIL DE LLANTA OPTIMIZADO 284

4.1. Criterios de optimización considerados 285

4.1.1. Riesgo de descarrilamiento (l_{v0}) 286

4.1.2. Desgaste (l_{Desgaste}) 289

4.1.3. Tensión de contacto rueda-carril ($I_{\text{Tensión}}$) 29

4.1.4. Índice total (I_T) 297

4.2. El vehículo 293

4.2.1. Datos de la caja 29

4.2.2. Datos de los bogies y ejes 29

4.2.3. Datos de la suspensión secundaria 29

4.2.4. Datos de la suspensión primaria 297

4.2.5. Perfiles de llanta iniciales 298

4.3. La vía 300

4.3.1. Datos acerca de la superestructura de la vía 300

4.3.1.1. Datos acerca de la superestructura de la vía ferroviaria 30

4.3.1.2. Datos acerca de la superestructura de la vía tranviaria 30

4.3.2. Datos acerca del trazado de la vía 30.

4.3.2.1. Estudio de los trazados reales 30

4.3.2.1.1. Estudio del trazado real ferroviario 30

4.3.2.1.2. Estudio del trazado real tranviario 30

4.3.2.2. Ponderación según carga de tráfico 31

4.3.2.3. Hipótesis de funcionamiento simétrico de la red 31

4.3.2.4. Análisis de sensibilidad del trazado de la vía 31

4.3.2.4.1. Análisis de sensibilidad para el trazado
ferroviario 31

4.3.2.4.2. Análisis de sensibilidad para el trazado
tranviario 32

4.3.2.5. Definición de los trazados característicos	327
4.3.2.5.1. Caracterización del trazado para vías ferroviarias	327
4.3.2.5.1.1. Radio umbral	327
4.3.2.5.1.2. Definición de los intervalos de radio	328
4.3.2.5.1.3. Parámetros representativos de los intervalos de caracterización	328
4.3.2.5.1.4. Caracterización	328
4.3.2.5.1.5. Trazado característico adoptado para vías ferroviarias	332
4.3.2.5.2. Caracterización del trazado para vías tranviarias	334
4.3.2.5.2.1. Radio umbral	334
4.3.2.5.2.2. Definición de los intervalos de radio	335
4.3.2.5.2.3. Consideración sobre las curvas de transición	335
4.3.2.5.2.4. Parámetros representativos de los intervalos de caracterización	335
4.3.2.5.2.5. Caracterización	336
4.3.2.5.2.6. Trazado característico adoptado para vías tranviarias	340
4.4. Otros datos e hipótesis	342
4.4.1. Velocidades de circulación en el modelo de dinámica ferroviaria	342
4.4.1.1. Velocidad de circulación sobre vía ferroviaria	342
4.4.1.2. Velocidad de circulación sobre vía tranviaria	343
4.4.2. Irregularidades de la vía	343
4.4.3. Coeficiente de fricción	343
4.5. Programa de dinámica ferroviaria	343
4.6. Resultados de las simulaciones	344
4.7. Algoritmo Genético	346
4.7.1. ¿Qué son los Algoritmos Genéticos?	346
4.7.2. Funcionamiento básico de los Algoritmos Genéticos	347
4.7.3. Algoritmo Genético utilizado en esta Tesis	348
4.7.4. Funcionamiento básico del Algoritmo Genético desarrollado	349
4.7.5. Principales modificaciones del algoritmo original	353
4.7.6. Programa de creación de la primera generación del algoritmo	354
4.7.7. Programa principal de generación del algoritmo	356
4.7.8. Archivo de resultados	367
4.8. Convergencia del Algoritmo Genético	367
5. OPERACIONES FINALES A REALIZAR TRAS LA EJECUCIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO	367
6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA A LOS CASOS CONCRETOS EJECUTADOS EN ESTA TESIS	370
6.1. Evolución del proceso de generación	370
6.1.1. Ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	370
6.1.1.1. Tabla de resultados de los índices	370
6.1.1.2. Convergencia del proceso de generación	372

6.1.1.3. Mejora de los índices considerados	376
6.1.1.4. Conclusión	378
6.1.2. Ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	378
6.1.2.1. Tabla de resultados de los índices	378
6.1.2.2. Convergencia del proceso de generación	383
6.1.2.3. Mejora de los índices considerados	383
6.1.2.4. Conclusión	383
6.2. Otros perfiles de llanta obtenidos en el proceso de generación	385
6.2.1. Ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	385
6.2.2. Ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	387
6.3. Modificaciones a realizar sobre los perfiles de llanta obtenidos con el Algoritmo Genético	389
6.3.1. Ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	391
6.3.2. Ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	398
6.4. Comprobaciones a realizar sobre los perfiles modificados	405
6.4.1. Valor de q_R	405
6.4.1.1. Teoría de Nadal sobre descarrilamiento	405
6.4.1.2. Consecuencias de la Teoría de Nadal para la circulación sobre los aparatos de vía	408
6.4.1.3. Definición del parámetro q_R para seguridad frente a descarrilamiento al paso por aparatos de vía	409
6.4.1.4. Valor límite de q_R en los perfiles de rueda de FEVE	410
6.4.1.5. Comprobación de q_R en los perfiles de llanta modificados	410
6.4.1.5.1. Ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	410
6.4.1.5.2. Ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	412
6.4.2. Conicidad equivalente	412
6.4.2.1. Definición de conicidad equivalente	412
6.4.2.2. Importancia de la conicidad equivalente	414
6.4.2.3. Valores límite de conicidad equivalente	414
6.4.2.4. Comprobación de conicidad para los perfiles de llanta elegidos	415
6.4.2.4.1. Ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	415
6.4.2.4.2. Ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	415
6.5. Resultados obtenidos tras la optimización y las modificaciones	418
6.5.1. Perfiles de llanta elegidos	418
6.5.2. Mejora final de los índices considerados	419
6.5.3. Puntos de contacto rueda-carril	420
6.5.3.1. Contactos rueda-carril para las llantas iniciales del proceso de generación	420
6.5.3.2. Contactos rueda-carril para la llanta elegida para la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	422
6.5.3.3. Contactos rueda-carril para la llanta elegida para la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	425
6.5.4. Valores filtrados de Y/Q	425
6.5.4.1. Valores filtrados de Y/Q para circulación sobre la red ferroviaria	427

6.5.4.2. Valores filtrados de Y/Q para circulación sobre la red tranviaria	433
6.5.5. Valores de la disipación de energía de desgaste	439
6.5.5.1. Valores de la disipación de energía de desgaste para circulación sobre la red ferroviaria	439
6.5.5.2. Valores de la disipación de energía de desgaste para circulación sobre la red tranviaria	448
6.5.6. Valores de la tensión de contacto rueda-carril	457
6.5.6.1. Valores de la tensión de contacto rueda-carril para circulación sobre la red ferroviaria	458
6.5.6.2. Valores de la tensión de contacto rueda-carril para circulación sobre la red tranviaria	464
6.5.6.3. Conclusión acerca del índice $I_{\text{Tensión}}$	469
7. POSIBLES SOLUCIONES AL PROBLEMA DE GUIADO EN LOS APARATOS DE VÍA PARA EL CASO FEVE	469
7.1. Caso de sistema tranviario de primera implantación	470
7.2. Caso de sistema tranviario existente	470
7.2.1. Entrecalle carril-contracarril necesaria	470
7.2.2. Comprobaciones sobre los perfiles de llanta elegidos	471
7.2.2.1. Caso a: valor de la entrecalle carril-contracarril por debajo del límite	472
7.2.2.2. Caso b: valor de la entrecalle carril-contracarril por encima o en el límite	474
7.2.3. Comportamiento al paso sobre corazones dobles	474
8. SOLUCIONES AL CASO DE SISTEMA TRANVIARIO DE NUEVA IMPLANTACIÓN	475
9. CONCLUSIONES	482
9.1. Caso de sistema tranviario de nueva implantación	482
9.2. Caso de sistema tranviario existente	482
REFERENCIAS	484

CAPÍTULO 10: GÁLIBO 489

1. INTRODUCCIÓN	491
2. EL GÁLIBO EN FEVE	491
3. SOLUCIÓN ADOPTADA EN OTROS PAÍSES	493
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA PARA EL CASO FEVE	495
4.1. Comprobación del gálibo estático	498
4.2. Comprobación del gálibo cinemático	502
4.2.1. Datos necesarios para la obtención del gálibo cinemático	502

4.2.2. Metodología de obtención del galibo cinemático	503
4.2.2.1. Determinación de los puntos de control	503
4.2.2.2. Obtención de los valores extremos de las coordenadas de los puntos de control para circulación del vehículo sobre la vía	503
4.2.2.3. Obtención de la envolvente de galibo cinemático para circulación del vehículo sobre la vía	530
4.2.3. Comprobación del cumplimiento del galibo cinemático de FEVE para circulación del vehículo sobre la vía	538
5. RECOMENDACIONES PARA EL CASO FEVE	539
5.1. Recomendaciones para el caso del galibo estático	539
5.2. Recomendaciones para el caso del galibo cinemático	539
REFERENCIAS	541

CAPÍTULO 11: CONCLUSIONES..... 543

CAPÍTULO 12: LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS 553

REFERENCIAS 561

ANEJO 1: METODOLOGÍA DE COMPARACIÓN DE RIESGO 575

1. INTRODUCCIÓN	577
2. METODOLOGÍA DE COMPARACIÓN DE RIESGO	577
REFERENCIAS	581

ANEJO 2: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE TRAZADO FERROVIARIO Y TRANVIARIO 583

1. INTRODUCCIÓN	585
2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL PROBLEMA FERROVIARIO	586
2.1. Planteamiento general	586

2.2. Ejemplos de trazado	590
2.3. Resultados y conclusiones del análisis de sensibilidad para trazado ferroviario	592
3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL PROBLEMA TRANVIARIO	605
3.1. Planteamiento general	605
3.2. Ejemplos de trazado	607
3.3. Resultados y conclusiones del análisis de sensibilidad para trazado tranviario	608
REFERENCIAS	618

ANEJO 3: TRAZADOS CARACTERÍSTICOS 619

1. INTRODUCCIÓN	621
2. CARACTERIZACIÓN DEL TRAZADO FERROVIARIO	622
2.1. Radio umbral de las curvas a considerar	622
2.2. Intervalos de radio	623
2.3. Parámetros representativos de los intervalos de caracterización	623
2.4. Caracterizaciones realizadas	624
2.5. Trazados característicos	633
2.5.1. Trazado característico ferroviario 50a	634
2.5.2. Trazado característico ferroviario 50b	635
2.5.3. Trazado característico ferroviario 100a	636
2.5.4. Trazado característico ferroviario 100b	637
2.5.5. Trazado característico ferroviario 250	638
2.6. Comparación de trazados característicos	639
3. CARACTERIZACIÓN DEL TRAZADO TRANVIARIO	641
3.1. Radio umbral de las curvas a considerar	641
3.2. Intervalos de radio	642
3.3. Consideración sobre las curvas de transición	643
3.4. Parámetros representativos de los intervalos de caracterización	644
3.5. Caracterizaciones realizadas	645
3.6. Trazados característicos	648
3.6.1. Trazado tranviario para simulación del trazado real	654
3.6.2. Trazado característico tranviario 25a	657
3.6.3. Trazado característico tranviario 25b	660
3.6.4. Trazado característico tranviario 50a	662
3.6.5. Trazado característico tranviario 50b	663

3.6.6. Trazado característico tranviario 100a	664
3.6.7. Trazado característico tranviario 100b	666
3.7. Comparación de trazados característicos	667
REFERENCIAS	670

ANEJO 4: ALGORITMO GENÉTICO 671

1. INTRODUCCIÓN	673
2. ALGORITMOS GENÉTICOS	673
2.1. ¿Qué son los Algoritmos Genéticos?	673
2.2. Aparición de los Algoritmos Genéticos	673
2.3. Diferencias de los Algoritmos Genéticos respecto a los métodos tradicionales	674
2.4. El Algoritmo Genético Simple	674
2.4.1. Operador reproducción	675
2.4.2. Operador cruce o apareamiento	676
2.4.3. Operador mutación	677
3. ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO EN ESTA TESIS	678
4. FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL ALGORITMO	678
5. PRINCIPALES MODIFICACIONES DEL ALGORITMO ORIGINAL	682
6. PROGRAMA DE CREACIÓN DE LA PRIMERA GENERACIÓN DEL ALGORITMO	684
8.1. Bloque inicial	684
8.2. Bucle de ejecución de la primera generación y almacenamiento de resultados	685
9. PROGRAMA PRINCIPAL DE GENERACIÓN DEL ALGORITMO	689
9.1. Bloque inicial	689
9.2. Bloque de lectura de resultados anteriores	690
9.3. Bucle de optimización	691
8. ARCHIVO DE RESULTADOS	714
REFERENCIAS	716

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1:	Círculo vicioso del transporte público sin reserva de plataforma	61
Figura 1.2:	Características positivas y negativas del transporte público y privado sobre el usuario y la comunidad	67
Figura 2.1:	Disminución del tiempo de viaje aumentando el número de paradas	82
Figura 3.1:	Red ferroviaria en el centro de Karlsruhe	95
Figura 3.2:	Red de Karlsruhe (tranvía, ferrocarril, tranvitrén)	96
Figura 3.3:	Tranvitrén circulando por el centro de Karlsruhe	97
Figura 3.4:	Esquema del tranvitrén de Karlsruhe	101
Figura 3.5:	Tranvitrén de Karlsruhe en estación ferroviaria (Baden-Baden)	102
Figura 3.6:	Tranvitrén de Karlsruhe circulando en zona urbana con vía en césped	102
Figura 3.7:	Red ferroviaria en la región de Saarbrücken	104
Figura 3.8:	Línea de Saarbrücken	107
Figura 3.9:	Red planificada para Saarbrücken	108
Figura 3.10:	Sección de calle en Saarbrücken antes y después de la implantación del Saarbahn	109
Figura 3.11:	Esquema del vehículo de Saarbrücken	112
Figura 3.12:	Saarbahn circulando por zona urbana	114
Figura 3.13:	Saarbahn circulando por zona ferroviaria	114
Figura 3.14:	Red de tranvías y Regiotram de Kassel	116
Figura 3.15:	Esquema del tranvitrén de Kassel	118
Figura 3.16:	Pruebas en Kassel con el vehículo de Saarbrücken	118
Figura 3.17:	Red ferroviaria de Braunschweig	119
Figura 3.18:	Red tranvía regional Braunschweig	120
Figura 3.19:	Red de tranvitrén de Heilbronn	123
Figura 3.20:	Situación de los proyectos de tranvitrén en Francia a finales del año 2002	124
Figura 3.21:	Línea de tranvitrén de Genève	125
Figura 3.22:	Línea Aulnay - Bondy	128
Figura 3.23:	Red de Strasbourg	131
Figura 3.24:	Red de tranvitrén de Mulhouse	134
Figura 3.25:	Red de tranvitrén de Grenoble	135
Figura 3.26:	Tranvitrén francés (Avanto de Siemens)	138
Figura 3.27:	Red de metro de Sunderland	140
Figura 3.28:	Metro de Sunderland sobre vías ferroviarias convencionales	141
Figura 3.29:	Línea de Nottingham	142
Figura 3.30:	Red planteada para el "tranvitrén" de Alicante	143
Figura 3.31:	Línea de tren-tranvía de Zwickau	148
Figura 3.32:	RegioSprinter circulando en zona ferroviaria	149
Figura 3.33:	RegioSprinter en parada urbana	149

Figura 4.1:	Líneas de FEVE y densidad de población por Concejos en Asturias	160
Figura 4.2:	Líneas de FEVE y densidad de población por Ayuntamientos en Cantabria	160
Figura 4.3:	Red de FEVE en España	170
Figura 5.1:	Tranvía de Messina (Sicilia) con dispositivo anticabalgamiento	185
Figura 5.2:	Supervivencia del conductor	186
Figura 5.3:	Disposición de superficies alternativas para compatibilidad de topes	187
Figura 5.4:	Alturas de impacto de cada situación de colisión	187
Figura 6.1:	Red de FEVE en España	198
Figura 6.2:	Equipamiento de tracción del vehículo de Karlsruhe	199
Figura 6.3:	Equipamiento de tracción del vehículo de Saarbrücken	200
Figura 6.4:	Punto de cambio de sistema de electrificación	202
Figura 6.5:	Plano de la línea Ohtsu-Kyoto en Japón	208
Figura 6.6:	Vehículo bajo 1 500 V CC circulando por la calle	209
Figura 6.7:	Entrada de la línea de ferrocarriles Keihan en el entorno urbano	209
Figura 6.8:	Ferrocarril LEB en parada con plataforma reservada	210
Figura 6.9:	Ferrocarril LEB en trazado urbano	210
Figura 6.10:	Vehículo de la ASD circulando por la calle con tráfico compartido	211
Figura 6.11:	Vehículo de la AL circulando por la calle con tráfico compartido	211
Figura 6.12:	Vehículo de los Chemins de Fer du Jura circulando por la calle con tráfico compartido	212
Figura 6.12:	Sistema de alimentación eléctrica Innorail	213
Figura 6.14:	Esquema de paso por punto de cambio de tensión	214
Figura 6.15:	Esquema de una pila de combustible	220
Figura 8.1:	Distancias andén-vehículo en paradas urbanas y estaciones ferroviarias en recta	243
Figura 8.2:	Sección con cuatro carriles en estación	248
Figura 8.3:	Detalle de los aparatos de vía en aproximación a estaciones	248
Figura 8.4:	Detalle de sección de estación con seis carriles	249
Figura 8.5:	Disposición de nuevas estaciones en paralelo para el tranvitrén	249
Figura 8.6:	Dispositivo de entrada del vehículo de Saarbrücken	252

Figura 8.7:	Plataforma retráctil	252
Figura 8.8:	Disposición de paradas del autobús de Curitiba	253
Figura 8.9:	Disposición de paradas del autobús de Curitiba	253
Figura 8.10:	Solución intermedia al acceso de viajeros	254
Figura 8.11:	Disposición de nuevas estaciones en serie para el tranvitrén	255
Figura 8.12:	Rebaje de la cota de la vía en las paradas de la zona urbana	257
Figura 8.13:	Esquema de funcionamiento escalones retráctiles	258
Figura 8.14:	Escalón retráctil desplegado en estación ferroviaria	258
Figura 8.15:	Escalón retráctil desplegado en parada urbana	258
Figura 8.16:	Detalle de escalón retráctil	258
Figura 8.17:	Ascensor de acceso a vehículo	259
Figura 8.18:	Vehículo a dos alturas. Longitudinal por pasillo central	260
Figura 8.19:	Vehículo a dos alturas. Planta	260
Figura 8.20:	Vehículo a dos alturas. Sección AA	261
Figura 8.21:	Vehículo a dos alturas. Sección BB	261
Figura 9.1:	Perfil de rueda UNE 25102	267
Figura 9.2:	Perfil de rueda del tranvía de Bilbao	268
Figura 9.3:	Superestructura de la vía de FEVE	268
Figura 9.4:	Superestructura tranvía de Bilbao	269
Figura 9.5:	Sección de paso por corazón de desvío	270
Figura 9.6:	Planta de paso de eje montado por corazón de desvío	270
Figura 9.7:	Carriles S49 y Ri 59N alemanes	272
Figura 9.8:	Perfil de llanta de Karlsruhe	272
Figura 9.9:	Uso de contracarriles elevados y llantas especiales de tranvitrén	273
Figura 9.10:	Perfil de llanta de Saarbrücken	273
Figura 9.11:	Perfiles de carril de Saarbrücken	274
Figura 9.12:	Perfil de llanta para circulación ilimitada sobre red ferroviaria	275
Figura 9.13:	Perfil de llanta para circulación limitada sobre red ferroviaria	276
Figura 9.14:	Perfil de llanta para circulación limitada sobre red ferroviaria, con opción de contracarriles elevados	276
Figura 9.15:	Recomendaciones británicas sobre el perfil de llanta de los vehículos de tranvitrén	279
Figura 9.16:	Perfil de llanta del tranvitrén francés	280

Figura 9.17:	Diagrama de flujo de la metodología de optimización del perfil de llanta	285
Figura 9.18:	Fuerzas de contacto rueda-carril sobre ejes de coordenadas generales	286
Figura 9.19:	Fuerzas de contacto rueda-carril sobre ejes de coordenadas locales del contacto	287
Figura 9.20:	Fuerzas al comienzo del remonte de la pestaña, según Nadal	287
Figura 9.21:	Curva de interpolación del índice I_{YQ}	289
Figura 9.22:	Curva de interpolación del índice $I_{Desgaste}$	291
Figura 9.23:	Esquema del vehículo de tranvitrén utilizado en el modelo	194
Figura 9.24:	Dimensiones de la caja considerada para modelizar el vehículo (en m)	295
Figura 9.25:	Esquema del bogie tipo utilizado, planta	295
Figura 9.26:	Esquema del bogie tipo utilizado, perfil	296
Figura 9.27:	Datos relacionados con la rigidez de los muelles	296
Figura 9.28:	Rigidez de los topes de carrera laterales de la suspensión secundaria	297
Figura 9.29:	Rigidez de los topes de carrera laterales de la suspensión primaria	298
Figura 9.30:	Distancia entre círculos de rodadura en el eje del vehículo de tranvitrén	299
Figura 9.31:	Zona del perfil de llanta UNE 25102 a introducir como perfil inicial en el modelo	299
Figura 9.32:	Zona del perfil de llanta del tranvía de Bilbao a introducir como perfil inicial en el modelo	300
Figura 9.33:	Modelización de la vía	301
Figura 9.34:	Interpolación k_{wr} en función del ángulo de contacto para vía ferroviaria	301
Figura 9.35:	Interpolación c_{wr} en función del ángulo de contacto para vía ferroviaria	302
Figura 9.36:	Interpolación k_{wr} en función del ángulo de contacto para vía tranviaria	303
Figura 9.37:	Ponderación de la carga de tráfico en función de la frecuencia en cada zona	313
Figura 9.38:	Funcionamiento simétrico de la red sin girar el vehículo 180° en estaciones terminales	315
Figura 9.39:	Funcionamiento simétrico de la red girando el vehículo 180° en estaciones terminales	315

Figura 9.40:	Funcionamiento básico del AG desarrollado en esta Tesis	350
Figura 9.41:	Obtención de nueva generación de perfiles a partir de la anterior	352
Figura 9.42:	Archivo de resultados tras la ejecución de la primera generación	357
Figura 9.43:	Archivo de resultados tras la ejecución de la octava generación del primer caso particular resuelto en esta Tesis	366
Figura 9.44:	Operaciones finales tras ejecución del AG	368
Figura 9.45:	Dimensiones de carri Ri 60	369
Figura 9.46:	Perfil de la llanta_232_010 obtenida con el Algoritmo Genético para la ejecución con coeficientes 5/2 - 2/7	376
Figura 9.47:	Perfil de la llanta_222_010 obtenida con el Algoritmo Genético para la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	384
Figura 9.48:	Comparación entre mejores perfiles de llanta de las generaciones con coeficientes 5/7 - 2/7 y 5/9 - 4/9	384
Figura 9.49:	LLanta_231_010 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.50:	LLanta_219_009 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.51:	LLanta_212_008 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.52:	LLanta_192_009 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.53:	LLanta_185_008 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.54:	LLanta_184_008 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.55:	LLanta_178_009 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.56:	LLanta_177_007 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.57:	LLanta_166_009 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.58:	LLanta_161_010 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.59:	LLanta_152_009 ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	386
Figura 9.60:	Comparación de los mejores perfiles de llanta cada 50 generaciones para la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	387
Figura 9.61:	LLanta_208_007 ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	388
Figura 9.62:	LLanta_176_009 ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	388
Figura 9.63:	LLanta_170_007 ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	388
Figura 9.64:	LLanta_169_009 ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	388
Figura 9.65:	LLanta_166_006 ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	388
Figura 9.66:	LLanta_165_007 ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	388
Figura 9.67:	LLanta_162_010 ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	388
Figura 9.68:	LLanta_155_005 ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	388

Figura 9.69:	LLanta_154_006 ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	388
Figura 9.70:	Comparación de los mejores perfiles de llanta cada 50 generaciones para la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	389
Figura 9.71:	Ajuste del perfil de llanta modificado al perfil de llanta obtenido con el Algoritmo Genético	390
Figura 9.72:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_232_010 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	391
Figura 9.73:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_231_010 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	391
Figura 9.74:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_219_009 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	392
Figura 9.75:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_212_008 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	392
Figura 9.76:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_192_009 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	392
Figura 9.77:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_185_008 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	393
Figura 9.78:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_184_008 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	393
Figura 9.79:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_178_009 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	393
Figura 9.80:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_177_007 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	394
Figura 9.81:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_166_009 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	394
Figura 9.82:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_161_010 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	394
Figura 9.83:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_152_009 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	395
Figura 9.84:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_222_010 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	399
Figura 9.85:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_208_007 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	399
Figura 9.86:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_176_009 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	399
Figura 9.87:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_170_007 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	400
Figura 9.88:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_169_009 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	400

Figura 9.89:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_166_006 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	400
Figura 9.90:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_165_007 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	401
Figura 9.91:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_162_010 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	401
Figura 9.92:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_155_005 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	401
Figura 9.93:	Perfil de llanta modificado a partir de la llanta_154_006 obtenida en la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	402
Figura 9.94:	Sistema de fuerzas en el punto de contacto	405
Figura 9.95:	Movimiento de lazo	407
Figura 9.96:	Modificación del punto de contacto	407
Figura 9.97:	Zonas de riesgo frente a descarrilamiento al paso por los desvíos	409
Figura 9.98:	Influencia del desgaste del perfil de llanta en el contacto con la aguja al paso por los aparatos de vía	409
Figura 9.99:	Definición de q_r	410
Figura 9.100:	Perfil de llanta propuesto para la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7, pendiente de comprobación de conicidad	411
Figura 9.101:	Perfil de llanta propuesto para la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9, pendiente de comprobación de conicidad	413
Figura 9.102:	Variación de radio de rodadura en función de y	413
Figura 9.103:	Diferencia entre perfiles cónicos y desgastados	414
Figura 9.104:	Conicidad equivalente de la llanta_219_009_modificada para circulación ferroviaria	416
Figura 9.105:	Conicidad equivalente de la llanta_219_009_modificada para circulación tranviaria	416
Figura 9.106:	Conicidad equivalente de la llanta_166_006_modificada para circulación ferroviaria	417
Figura 9.107:	Conicidad equivalente de la llanta_166_006_modificada para circulación tranviaria	417
Figura 9.108:	Perfil de llanta elegido para el vehículo de tranvitrén en el caso de la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	418
Figura 9.109:	Perfil de llanta elegido para el vehículo de tranvitrén en el caso de la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	419
Figura 9.110:	Puntos de contacto rueda-carril entre la llanta UNE 25102 modificada utilizada como llanta inicial, y el carril UIC-54, con inclinación 1:20, de las líneas de FEVE	421

Figura 9.111:	Puntos de contacto rueda-carril entre la llanta UNE 25102 modificada utilizada como llanta inicial, y el carril Ri-60 en posición vertical, de las líneas del tranvía de Bilbao	421
Figura 9.112:	Puntos de contacto rueda-carril entre la llanta del tranvía de Bilbao modificada utilizada como llanta inicial, y el carril UIC-54, con inclinación 1:20, de las líneas de FEVE	423
Figura 9.113:	Puntos de contacto rueda-carril entre la llanta del tranvía de Bilbao modificada utilizada como llanta inicial, y el carril Ri-60 en posición vertical, de las líneas del tranvía de Bilbao	423
Figura 9.114:	Puntos de contacto rueda-carril entre la llanta elegida para la ejecución con coeficientes 5/7-2/7, y el carril UIC-54, con inclinación 1:20, de las líneas de FEVE	424
Figura 9.115:	Puntos de contacto rueda-carril entre la llanta elegida para la ejecución con coeficientes 5/7-2/7, y el carril Ri-60 en posición vertical, de las líneas del tranvía de Bilbao	424
Figura 9.116:	Puntos de contacto rueda-carril entre la llanta elegida para la ejecución con coeficientes 5/9-4/9, y el carril UIC-54, con inclinación 1:20, de las líneas de FEVE	426
Figura 9.117:	Puntos de contacto rueda-carril entre la llanta elegida para la ejecución con coeficientes 5/9-4/9, y el carril Ri-60 en posición vertical, de las líneas del tranvía de Bilbao	426
Figura 9.118:	Valores filtrados de Y/Q para la rueda izquierda del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	428
Figura 9.119:	Valores filtrados de Y/Q para la rueda izquierda del primer eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	430
Figura 9.120:	Valores de Y circulando sobre la primera curva de la red ferroviaria. Perfil de llanta elegido para análisis con 5/7-2/7	431
Figura 9.121:	Valores de Q circulando sobre la primera curva de la red ferroviaria. Perfil de llanta elegido para análisis con 5/7-2/7	432
Figura 9.122:	Valores filtrados de Y/Q para la rueda izquierda del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	434
Figura 9.123:	Valores filtrados de Y/Q para la rueda izquierda del primer eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	437

Figura 9.124:	Valores de Y circulando sobre la primera curva de la red tranviaria. Perfil de llanta elegido para análisis con 5/7-2/7	438
Figura 9.125:	Valores de Q circulando sobre la primera curva de la red tranviaria. Perfil de llanta elegido para análisis con 5/7-2/7	438
Figura 9.126:	Disipación de energía de desgaste para la rueda izquierda del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R(m) y con diferentes perfiles de llanta	440
Figura 9.127:	Disipación de energía de desgaste para la rueda derecha del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R(m) y con diferentes perfiles de llanta	441
Figura 9.128:	Disipación de energía de desgaste para la rueda izquierda del segundo eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R(m) y con diferentes perfiles de llanta	442
Figura 9.129:	Disipación de energía de desgaste para la rueda derecha del segundo eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R(m) y con diferentes perfiles de llanta	443
Figura 9.130:	Disipación de energía de desgaste para la rueda izquierda del primer eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R(m) y con diferentes perfiles de llanta	444
Figura 9.131:	Disipación de energía de desgaste para la rueda derecha del primer eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R(m) y con diferentes perfiles de llanta	445
Figura 9.132:	Disipación de energía de desgaste para la rueda izquierda del segundo eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R(m) y con diferentes perfiles de llanta	446
Figura 9.133:	Disipación de energía de desgaste para la rueda derecha del segundo eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R(m) y con diferentes perfiles de llanta	447

Figura 9.134:	Disipación de energía de desgaste para la rueda izquierda del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio $R(m)$ y con diferentes perfiles de llanta	449
Figura 9.135:	Disipación de energía de desgaste para la rueda derecha del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio $R(m)$ y con diferentes perfiles de llanta	450
Figura 9.136:	Disipación de energía de desgaste para la rueda izquierda del segundo eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio $R(m)$ y con diferentes perfiles de llanta	451
Figura 9.137:	Disipación de energía de desgaste para la rueda derecha del segundo eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio $R(m)$ y con diferentes perfiles de llanta	452
Figura 9.138:	Disipación de energía de desgaste para la rueda izquierda del primer eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio $R(m)$ y con diferentes perfiles de llanta	453
Figura 9.139:	Disipación de energía de desgaste para la rueda derecha del primer eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio $R(m)$ y con diferentes perfiles de llanta	454
Figura 9.140:	Disipación de energía de desgaste para la rueda izquierda del segundo eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio $R(m)$ y con diferentes perfiles de llanta	455
Figura 9.141:	Disipación de energía de desgaste para la rueda derecha del segundo eje del segundo bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio $R(m)$ y con diferentes perfiles de llanta	456
Figura 9.142:	Percentiles de confianza en una distribución normal	458
Figura 9.143:	Tensión de contacto rueda-carril para la rueda izquierda del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio $R(m)$ y con diferentes perfiles de llanta	459

Figura 9.144:	Tensión de contacto rueda-carril para la rueda derecha del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	460
Figura 9.145:	Tensión de contacto rueda-carril para la rueda izquierda del segundo eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, con diferentes perfiles de llanta	461
Figura 9.146:	Tensión de contacto rueda-carril para la rueda derecha del segundo eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red ferroviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	462
Figura 9.147:	Tensión de contacto rueda-carril para la rueda izquierda del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	465
Figura 9.148:	Tensión de contacto rueda-carril para la rueda derecha del primer eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	466
Figura 9.149:	Tensión de contacto rueda-carril para la rueda izquierda del segundo eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	467
Figura 9.150:	Tensión de contacto rueda-carril para la rueda derecha del segundo eje del primer bogie del vehículo, circulando sobre la red tranviaria, en función del radio R (m) y con diferentes perfiles de llanta	468
Figura 9.151:	Propuesta de nueva formulación del $I_{\text{Tensión}}$ en función de la tensión máxima	469
Figura 9.152:	Definición de la cota de protección de la punta del corazón al paso por los aparatos de vía ferroviarios	471
Figura 9.153:	Dimensiones del eje montado de FEVE	471
Figura 9.154:	Ejemplo de perfil de llanta completo para comprobaciones de guiado	472
Figura 9.155:	Eje montado para comprobación de guiado	472
Figura 9.156:	Desvío con corazón de punta móvil (Bilbao)	472
Figura 9.157:	Recrecimiento de la zona interior del perfil de rueda	473
Figura 9.158:	Elevación de contracarriles para guiado de perfiles de llanta con recrecimiento de la cara interior	473
Figura 9.159:	Carril de garganta modificado, con cara activa similar a la del carril UIC-54 inclinado 1:20 hacia el interior de la vía	476

Figura 9.160:	Comparación del pseudodeslizamiento longitudinal sobre la primera curva de la red tranviaria, de $R = 39$ m, con el perfil de llanta ferroviario, considerando carril Ri-60 vertical y UIC-54 inclinado 1:20 hacia el interior	478
Figura 9.161:	Comparación de la fuerza de pseudodeslizamiento longitudinal sobre la primera curva de la red tranviaria, de $R = 39$ m, con el perfil de llanta ferroviario, considerando carril Ri-60 vertical y UIC-54 inclinado 1:20 hacia el interior	478
Figura 9.162:	Comparación del pseudodeslizamiento transversal sobre la primera curva de la red tranviaria, de $R = 39$ m, con el perfil de llanta ferroviario, considerando carril Ri-60 vertical y UIC-54 inclinado 1:20 hacia el interior	479
Figura 9.163:	Comparación de la fuerza de pseudodeslizamiento transversal sobre la primera curva de la red tranviaria, de $R = 39$ m, con el perfil de llanta ferroviario, considerando carril Ri-60 vertical y UIC-54 inclinado 1:20 hacia el interior	479
Figura 9.164:	Comparación del pseudodeslizamiento de giro sobre la primera curva de la red tranviaria, de $R = 39$ m, con el perfil de llanta ferroviario, considerando carril Ri-60 vertical y UIC-54 inclinado 1:20 hacia el interior	480
Figura 9.165:	Comparación del momento de pseudodeslizamiento sobre la primera curva de la red tranviaria, de $R = 39$ m, con el perfil de llanta ferroviario, considerando carril Ri-60 vertical y UIC-54 inclinado 1:20 hacia el interior	481
Figura 9.166:	Variación de radios con el perfil de llanta ferroviario, sobre carriles UIC-54 inclinado 1:20 hacia el interior y Ri-60 vertical, para el mismo desplazamiento transversal del eje (y)	481
Figura 10.1:	Gálibo normalizado exigido en las líneas de FEVE	492
Figura 10.2:	Sección transversal de la caja del Combino de Siemens	496
Figura 10.3:	Representación esquemática de la caja del vehículo de tranvitrén de 2 550 mm de ancho	496
Figura 10.4:	Perfil de llanta optimizado para el vehículo de tranvitrén en el caso de circulación con coeficientes 5/7 - 2/7 para vías ferroviarias y tranviarias	497
Figura 10.5:	Perfil de llanta optimizado para el vehículo de tranvitrén en el caso de circulación con coeficientes 5/9 - 4/9 para vías ferroviarias y tranviarias	497
Figura 10.6:	Posiciones extremas del vehículo para la determinación del gálibo estático	499

Figura 10.7:	Contorno más desfavorable del vehículo para comparación con el gálibo normalizado de FEVE	500
Figura 10.8:	Comparación del contorno más desfavorable del vehículo con el gálibo normalizado de FEVE	501
Figura 10.9:	Esquema del vehículo utilizado para las simulaciones y posición de los puntos de control	504
Figura 10.10:	Valores de la coordenada y del punto de control 5 al circular sobre la línea de FEVE considerada	506
Figura 10.11:	Valores de la coordenada z del punto de control 5 al circular sobre la línea de FEVE considerada	507
Figura 10.12:	Valores de la coordenada y del punto de control 6 al circular sobre la línea de FEVE considerada	508
Figura 10.13:	Valores de la coordenada z del punto de control 6 al circular sobre la línea de FEVE considerada	509
Figura 10.14:	Valores de la coordenada y del punto de control 7 al circular sobre la línea de FEVE considerada	510
Figura 10.15:	Valores de la coordenada z del punto de control 7 al circular sobre la línea de FEVE considerada	511
Figura 10.16:	Valores de la coordenada y del punto de control 8 al circular sobre la línea de FEVE considerada	512
Figura 10.17:	Valores de la coordenada z del punto de control 8 al circular sobre la línea de FEVE considerada	513
Figura 10.18:	Valores de la coordenada y del punto de control 9 al circular sobre la línea de FEVE considerada	514
Figura 10.19:	Valores de la coordenada z del punto de control 9 al circular sobre la línea de FEVE considerada	515
Figura 10.20:	Valores de la coordenada y del punto de control 10 al circular sobre la línea de FEVE considerada	516
Figura 10.21:	Valores de la coordenada z del punto de control 10 al circular sobre la línea de FEVE considerada	517
Figura 10.22:	Valores de la coordenada y del punto de control 11 al circular sobre la línea de FEVE considerada	518
Figura 10.23:	Valores de la coordenada z del punto de control 11 al circular sobre la línea de FEVE considerada	519
Figura 10.24:	Valores de la coordenada y del punto de control 12 al circular sobre la línea de FEVE considerada	520
Figura 10.25:	Valores de la coordenada z del punto de control 12 al circular sobre la línea de FEVE considerada	521
Figura 10.26:	Valores de la coordenada y del punto de control 13 al circular sobre la línea de FEVE considerada	522

Figura 10.27:	Valores de la coordenada z del punto de control 13 al circular sobre la línea de FEVE considerada	523
Figura 10.28:	Valores de la coordenada y del punto de control 14 al circular sobre la línea de FEVE considerada	524
Figura 10.29:	Valores de la coordenada z del punto de control 14 al circular sobre la línea de FEVE considerada	525
Figura 10.30:	Valores de la coordenada y del punto de control 15 al circular sobre la línea de FEVE considerada	526
Figura 10.31:	Valores de la coordenada z del punto de control 15 al circular sobre la línea de FEVE considerada	527
Figura 10.32:	Valores de la coordenada y del punto de control 16 al circular sobre la línea de FEVE considerada	528
Figura 10.33:	Valores de la coordenada z del punto de control 16 al circular sobre la línea de FEVE considerada	529
Figura 10.34:	Posiciones extremas de la sección delantera de la caja del vehículo para las posiciones correspondientes sobre la vía	534
Figura 10.35:	Posiciones extremas de la sección central de la caja del vehículo para las posiciones correspondientes sobre la vía	534
Figura 10.36:	Posiciones extremas de la sección trasera de la caja del vehículo para las posiciones correspondientes sobre la vía	535
Figura 10.37:	Envolvente de las posiciones extremas de la sección delantera de la caja del vehículo al circular sobre la curva de 128 m de radio	536
Figura 10.38:	Envolvente de las posiciones extremas de la sección central de la caja del vehículo al circular sobre la curva de 128 m de radio	536
Figura 10.39:	Envolvente de las posiciones extremas de la sección trasera de la caja del vehículo al circular sobre la curva de 128 m de radio	537
Figura 10.40:	Envolvente final de las tres envolventes de las posiciones extremas de las tres secciones del vehículo, coincidente con el gálibo cinemático del mismo	538
Figura 11.1:	Nueva propuesta de obtención del índice $I_{\text{Tensión}}$	549
Figura A2.1:	Perfil de rueda UNE 25102	586
Figura A2.2:	Perfil de rueda del tranvía de Bilbao	586
Figura A2.3:	Amortiguación de movimiento de lazo producido por irregularidad de la vía, para vehículo de tranvitrén dotado con la llanta UNE 25102, circulando a 50 km/h	587

Figura A2.4:	Amortiguación de movimiento de lazo producido por irregularidad de la vía, para vehículo de tranvitrén dotado con la llanta del tranvía de Bilbao, circulando a 50 km/h	588
Figura A4.1:	Ruleta sesgada para los individuos de la primera generación	675
Figura A4.2:	Funcionamiento básico del AG desarrollado en esta Tesis	679
Figura A4.3:	Obtención de nueva generación de perfiles a partir de la anterior	681
Figura A4.4:	Archivo Penalty_vhe_ligero.res tras ejecución de la primera generación	688
Figura A4.5:	Ejemplo de ruleta sesgada para los valores de I_{TP} de la tabla anterior	696
Figura A4.6:	Perfil de mutación a introducir en el vector cuarta derivada cuando la mutación es diferente de cero	707
Figura A4.7:	Archivo Penalty_vhe_ligero.res tras ejecución de la octava generación del primer caso particular analizado en esta Tesis	715

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1:	Distribución de población total, urbana y rural según regiones (1950-2030)	58
Tabla 1.2:	Grado de urbanización por regiones	58
Tabla 1.3:	Gravedad de congestión según el tamaño de la ciudad	60
Tabla 1.4:	Ocupación de espacio según modos	65
Tabla 1.5:	Capacidad típica y de saturación de los sistemas de transporte público urbano	71
Tabla 3.1:	Sistemas de tranvitrén existentes, en construcción o en avanzado estado de planificación	145
Tabla 3.2:	Sistemas de tranvitrén en estado de planificación previa	146
Tabla 4.1:	Evolución de viajeros de FEVE desde 1996	170
Tabla 4.2:	Evolución de mercancías de FEVE desde 1996	171
Tabla 5.1:	Requisitos de la norma UNE relativos a resistencia estructural	179
Tabla 5.2:	Condiciones de circulación por líneas ferroviarias para el tranvitrén alemán	181
Tabla 5.3:	Situaciones de colisión relevantes para el tranvitrén	184
Tabla 8.1:	Recopilación de soluciones planteadas	262
Tabla 9.1:	Recomendaciones británicas sobre el perfil de llanta de los vehículos de tranvitrén	279
Tabla 9.2:	Datos partida del trazado de la línea Bilbao-Balmaseda, de FEVE	307
Tabla 9.3:	Trazado supuesto de FEVE	309-310
Tabla 9.4:	Trazado del tranvía de Bilbao	312
Tabla 9.5:	Parámetros de los trazados característicos representativos del trazado ferroviario real	330
Tabla 9.6:	Comparación de índices para los diferentes trazados característicos ferroviarios	331
Tabla 9.7:	Parámetros de los trazados característicos representativos del trazado tranviario real	338
Tabla 9.8:	Comparación de índices para los diferentes trazados característicos tranviarios	339
Tabla 9.9:	Ejemplo de valores de A_d y R_{ul} para unos valores dados de I_{TP}	361
Tabla 9.10:	Evolución de los índices para la ejecución con coeficientes 5/7 y 2/7 (mejoras absolutas)	371-374
Tabla 9.11:	Mejora de los índices parciales que componen el I_{TF} para la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	377

Tabla 9.12:	Mejora de los índices parciales que componen el I_{TT} para la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	377
Tabla 9.13:	Evolución de los índices para la ejecución con coeficientes 5/9 y 4/9 (mejoras absolutas)	379-382
Tabla 9.14:	Mejora de los índices parciales que componen el I_{TF} para la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	384
Tabla 9.15:	Mejora de los índices parciales que componen el I_{TT} para la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	385
Tabla 9.16:	Valores de los índices totales y parciales para las mejores llantas de las 100 últimas generaciones de la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	387
Tabla 9.17:	Valores de los índices totales y parciales para las mejores llantas de las 100 últimas generaciones de la ejecución con coeficientes 5/9 - 4/9	389
Tabla 9.18:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_232_010_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	395
Tabla 9.19:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_231_010_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	396
Tabla 9.20:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_219_009_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	396
Tabla 9.21:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_212_008_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	396
Tabla 9.22:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_192_009_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	396
Tabla 9.23:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_185_008_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	397
Tabla 9.24:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_184_008_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	397
Tabla 9.25:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_178_009_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	397
Tabla 9.26:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_177_007_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	397

Tabla 9.27:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_166_009_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	398
Tabla 9.28:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_161_010_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	398
Tabla 9.29:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_152_009_modificada de la ejecución con coeficiente 5/7 - 2/7	398
Tabla 9.30:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_222_010_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	402
Tabla 9.31:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_208_007_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	402
Tabla 9.32:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_176_009_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	402
Tabla 9.33:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_170_007_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	403
Tabla 9.34:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_169_009_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	403
Tabla 9.35:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_166_006_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	403
Tabla 9.36:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_165_007_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	403
Tabla 9.37:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_162_010_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	404
Tabla 9.38:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_155_005_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	404
Tabla 9.39:	Variaciones de los índices totales y parciales de la llanta_154_006_modificada de la ejecución con coeficiente 5/9 - 4/9	404
Tabla 9.40:	Valores de q_R de los perfiles de llanta modificados para la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	411

Tabla 9.41:	Valores de q_R de los perfiles de llanta modificados para la ejecución con coeficientes 5/7 - 2/7	412
Tabla 9.42:	Variaciones de los índices totales y parciales del perfil de llanta elegido para la ejecución con coeficientes 5/7-2/7 respecto a la mejor de las llantas iniciales	419
Tabla 9.43:	Variaciones de los índices totales y parciales del perfil de llanta elegido para la ejecución con coeficientes 5/9-4/9 respecto a la mejor de las llantas iniciales	419
Tabla 9.44:	Resultados estadísticos de las distribuciones de tensión de contacto rueda-carril para circulación ferroviaria, y valores del índice de tensión correspondientes	463
Tabla 9.45:	Resultados estadísticos de las distribuciones de tensión de contacto rueda-carril para circulación tranviaria, y valores del índice de tensión correspondientes	464
Tabla 9.46:	Comparación de índices obtenidos con el vehículo de tranvitrén sobre la vía tranviaria, con carril Ri-60 y con carril similar a UIC-54 inclinado	477
Tabla 10.1:	Variación de coordenadas de los puntos de control respecto a la posición de reposo al circular sobre la vía, para los máximos o mínimos de cada punto de control	530
Tabla 10.2:	Variación de coordenadas de los puntos de control respecto a la posición de reposo al circular sobre la vía, para todas las posiciones sobre la misma que producen máximos o mínimos de los puntos de control de una sección del vehículo determinada	532-533
Tabla A1.1:	Tipos de accidentes a considerar en la comparación de riesgos	579
Tabla A1.2:	Resultados del estudio GAME para algunas explotaciones francesas	580
Tabla A2.1:	Radios y peraltes en el trazado Bilbao-Balmaseda de FEVE	589
Tabla A2.2:	Longitud teórica de las curvas de transición en FEVE	589
Tabla A2.3:	Resultados del análisis de sensibilidad para vehículo de tranvitrén dotado con perfil de llanta UNE 25102, circulando sobre vías ferroviarias	594-597
Tabla A2.4:	Resultados del análisis de sensibilidad para vehículo de tranvitrén dotado con perfil de llanta del tranvía de Bilbao, circulando sobre vías ferroviarias	598-601
Tabla A2.5:	Resultados del análisis de sensibilidad para vehículo de tranvitrén dotado con perfil de llanta UNE 25102, circulando sobre vías tranviarias	609-611

Tabla A2.6:	Resultados del análisis de sensibilidad para vehículo de tranvitrén dotado con perfil de llanta del tranvía de Bilbao, circulando sobre vías tranviarias	612-614
Tabla A3.1:	Parámetros del trazado característico ferroviario 50a	626
Tabla A3.2:	Parámetros del trazado característico ferroviario 50b	627
Tabla A3.3:	Parámetros del trazado característico ferroviario 100a	628
Tabla A3.4:	Parámetros del trazado característico ferroviario 100b	629
Tabla A3.5:	Parámetros del trazado característico ferroviario 250	630
Tabla A3.6:	Parámetros principales de los trazados característicos ferroviarios	639
Tabla A3.7:	Comparación de resultados de los índices para los trazados característicos ferroviarios	640
Tabla A3.8:	Parámetros del trazado característico tranviario 25a	646
Tabla A3.9:	Parámetros del trazado característico tranviario 25b	649
Tabla A3.10:	Parámetros del trazado característico tranviario 50a	650
Tabla A3.11:	Parámetros del trazado característico tranviario 50b	651
Tabla A3.12:	Parámetros del trazado característico tranviario 100a	652
Tabla A3.13:	Parámetros del trazado característico tranviario 100b	653
Tabla A3.14:	Parámetros principales de los trazados característicos tranviarios	667
Tabla A3.15:	Comparación de resultados de los índices para los trazados característicos tranviarios	668
Tabla A4.1:	Función de adaptación para los individuos de la primera generación	676
Tabla A4.2:	Copias en el grupo de apareamiento para los individuos de la primera generación	676
Tabla A4.3:	Grupo de apareamiento para la obtención de la segunda generación a partir de los individuos de la primera	677
Tabla A4.4:	Ejemplo de valores de Ad_j y Ru_j para unos valores dados de I_{TP}	695
Tabla A4.5:	Ejemplo para elección de perfiles a repetir en siguiente generación	698

Capítulo I
INTRODUCCIÓN

I. EL AUMENTO DE LA POBLACIÓN MUNDIAL Y EL CRECIMIENTO DE LAS ÁREAS METROPOLITANAS

Desde el inicio de la Revolución Industrial, a mediados del siglo XVIII, la población mundial ha ido creciendo a un ritmo cada vez más rápido. Así, en dicho siglo la población era de mil millones de personas, duplicándose en ciento treinta años (dos mil millones en 1930), y volviendo a duplicarse en menos de cuarenta y cinco años más (1974) [1].

Acompañando a este enorme crecimiento de la población, se ha venido produciendo un fenómeno de urbanización, es decir, de concentración de la población en las zonas metropolitanas. Este hecho se debe a que, con la Revolución Industrial, las ciudades ofrecían grandes oportunidades de empleo, atrayendo a la población rural. De esta manera se produjo un cambio del sector primario de la economía (agricultura) hacia el secundario (industria) y, en épocas posteriores, al terciario (servicios). Así, se estima que en la Edad Media el 80% de la población europea se dedicaba al sector primario, mientras que los sectores secundario y terciario ocupaban al 10% cada uno, variando mucho este reparto a partir de la Revolución Industrial [27].

Dado que los sectores secundario y terciario se concentran principalmente en las ciudades, este cambio entre sectores de producción dio lugar a un masivo movimiento de población de las áreas rurales a las urbanas, produciéndose este fenómeno de urbanización comentado.

Como muestra de este proceso cabe resaltar la siguiente evolución (véase la tabla 1.1):

- ☐ en el año 1800 menos del 3% de la población vivía en concentraciones de más de 20 000 habitantes;
- ☐ en 1950 la población urbana de las regiones más desarrolladas era considerablemente mayor que la de las zonas menos desarrolladas (446 millones frente a 304 millones), de tal manera que las regiones más desarrolladas suponían el 60% de la población urbana mundial en un momento en el que representaban el 32% de la población total;
- ☐ en 1975 la población urbana de las regiones menos desarrolladas ya había sobrepasado a la de las regiones más desarrolladas (810 millones frente a 734), y la diferencia se empezó a incrementar rápidamente a partir de este momento;
- ☐ en 2000 la población urbana de las regiones menos desarrolladas era el doble de la de las regiones más desarrolladas (2 000 millones frente a 900 millones);

- en 2030 se estima que las regiones menos desarrolladas tendrán el 80% de la población urbana mundial, y el 85% del total [26].

Grupo de desarrollo	Porcentaje de la población mundial			
	1950	1975	2000	2030
Población total				
Regiones más desarrolladas	32,3	25,8	19,7	14,7
Regiones menos desarrolladas	67,7	74,2	80,3	85,3
Población total				
Regiones más desarrolladas	59,5	47,6	31,4	20,2
Regiones menos desarrolladas	40,5	52,4	68,6	79,8
Población total				
Regiones más desarrolladas	20,8	12,5	9,2	6,4
Regiones menos desarrolladas	79,2	87,5	90,8	93,6

Tabla 1.1: Distribución de población total, urbana y rural según regiones (1950-2030). Fuente: [26].

Con respecto a la población europea, en la actualidad el 75% de la misma vive en áreas urbanas.

En la tabla 1.2 se puede observar el alcance de la urbanización en diferentes regiones del mundo.

Urbanización	1975	1995	2015	2020
Mundial	38%	46%	56%	58%
África	25%	36%	48%	51%
Asia	24%	34%	48%	51%
Europa	67%	72%	81%	82%
América Latina	61%	74%	82%	83%
Norteamérica	74%	77%	84%	85%
Oceanía	56%	67%	76%	78%

Tabla 1.2: Grado de urbanización por regiones
Fuente: [1].

2. AUMENTO DE MOVILIDAD Y CONGESTIÓN EN LAS CIUDADES

Como se ha constatado en el apartado anterior, la población de las ciudades se hace cada vez mayor, y como consecuencia, las ciudades se hacen también más extensas. Por otra parte, debido a la especialización del terreno metropolitano, que hace que ciertos tipos de actividades se concentren en ciertas zonas, se produce un aumento de la demanda de movilidad de sus habitantes, teniendo que realizar viajes cada vez más largos para ir a los centros de trabajo, de estudios, de ocio, etc.

Se debe destacar que, en el desarrollo de esta Tesis, se utilizará la palabra “metropolitano”, y en concreto la expresión de “transporte metropolitano”, con la acepción que se le da en [14], es decir, como “aquél en que, sin permanecer dentro de los límites de un único término municipal, sí se realiza dentro de una gran aglomeración urbana, con altas vinculaciones económicas y sociales entre los municipios que la integran, manteniendo los aspectos de unicidad en la aglomeración urbana afectada”. La palabra “suburbano” también adoptará este significado.

Al aumento de la demanda de movilidad se le suma la “revolución del automóvil”, que ha ocasionado una enorme proliferación de vehículos privados, que la gente utiliza cada vez más para sus desplazamientos, incluso para trayectos relativamente cortos.

En la Unión Europea, la distancia diaria recorrida por una persona se duplicó entre 1975 y 1995. Hoy día, el 80% de la totalidad de los trayectos personales en la Unión Europea se realiza en coche, y un 50% de los mismos son inferiores a 5 km [25].

Las conclusiones de diversos estudios avanzan que los trayectos, medidos en kilómetros por persona y año, se duplicarán de 1990 a 2020, y se volverán a duplicar de 2020 a 2050 [25].

Además, en el caso español, se está produciendo también un mayor incremento de la demanda de movilidad, debido, entre otras, a las siguientes razones:

- ❑ al aumento de la renta per cápita que se ha experimentado en nuestro país en las últimas décadas, y que da lugar a un mayor nivel de vida, asociado a una mayor demanda de movilidad para satisfacer las nuevas necesidades que esto conlleva;
- ❑ a la disminución del tamaño familiar, que hace que la población se desplace en grupos más pequeños, aumentando por tanto el número total de desplazamientos;
- ❑ al envejecimiento de la población, que aumenta el número de personas en edad de conducir; y
- ❑ a la evolución creciente de la tasa de actividad en los últimos años, con la incorporación de la mujer al mundo laboral, aumentando por tanto la demanda de movilidad de este sector de la población.

Ante este aumento de la demanda de movilidad la respuesta se puede orientar hacia dos vertientes: potenciación de la oferta por medio del transporte público o potenciación de la oferta orientada al transporte privado. En el caso español la opción elegida ha sido claramente la del transporte privado, que ha dado lugar a un aumento de la tasa de motorización, que se va acercando cada vez más a la de los demás países occidentales. En los países de la Unión Europea se ha

pasado de una tasa de motorización de 184 vehículos por cada 1 000 habitantes, en el año 1970, a 292 en 1980, 393 en 1990, y 469 en el año 2000. En España la evolución ha sido la siguiente: 107 vehículos por cada 1 000 habitantes, en el año 1970, 233 en 1980, 328 en 1990, y 466 en el año 2000 [13, 16, 18].

Para seguir con el planteamiento de primacía del vehículo privado como solución a la demanda de movilidad, se podría plantear la solución de aumentar la oferta, construyendo nuevas infraestructuras viarias (calles, autopistas, etc.). Sin embargo esta solución se encuentra limitada en el medio urbano por la escasez de suelo, además de las limitaciones presupuestarias existentes. Por otra parte, parece lógico pensar que esta solución sería temporal, ya que la construcción de nuevas vías tiende a potenciar el uso adicional de las mismas.

Por lo tanto, llega un momento en que el volumen de tráfico excede la capacidad de las vías existentes, de forma que cada vehículo adicional dificulta la circulación de los demás. A esta situación se la denomina congestión, y sus consecuencias sobre los usuarios y sobre el medio ambiente son nefastas, ya que aumenta el consumo de recursos escasos y hace mucho más difícil proporcionar un servicio de transporte público.

La magnitud del problema de la congestión en la Unión Europea es tal que se ha calculado que el coste de la congestión y la contaminación representa el 4% del producto interior bruto, es decir, alrededor de 150 000 millones de euros al año. Este valor tiene una tendencia claramente ascendente [1].

Según una encuesta realizada por la OCDE en 132 ciudades de 20 de sus países, únicamente un 5% de las mismas consideraba que no tenía problemas de congestión, mientras que un 7% consideraba que tenía problemas graves de este tipo. En general, estos problemas aumentan con el tamaño de la ciudad. Muestra de ello es la tabla 1.3 [4].

Tamaño ciudad (población)	Nota media caracterizando gravedad de congestión *
25 000 - 100 000	2,5
100 000 - 500 000	3,1
500 000 - 1 millón	3,2
1 - 3 millones	3,2
Más de 3 millones	4

*: Notas de 1 a 5 (1=sin problemas; 5=problemas muy graves)

Tabla 1.3: Gravedad de congestión según el tamaño de la ciudad. Fuente: [4].

La congestión produce un efecto negativo sobre la circulación, disminuyendo la velocidad de todos los vehículos de superficie, y afectando de forma particular a los sistemas de transporte público sin reserva de plataforma. Este hecho, unido al aumento de la motorización privada que ya se ha comentado, da lugar a una

disminución de los viajes en transporte público, de tal manera que se produce una disminución de demanda en el mismo, con la consiguiente disminución de la frecuencia y empeoramiento del servicio, produciéndose una retroalimentación del proceso, dando lugar al círculo vicioso del transporte público sin reserva de plataforma, ilustrado en la figura 1.1. Por otra parte, debido a la disminución del número de viajeros, se produce un aumento del déficit económico que sufren las empresas de transporte.

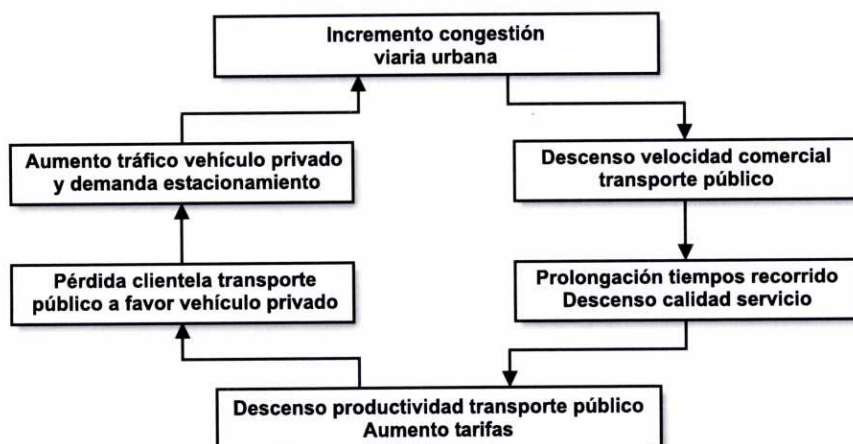


Figura 1.1: Círculo vicioso del transporte público sin reserva de plataforma.
Fuente: [2].

3. EL CONCEPTO DE TRANSPORTE SOSTENIBLE

Como hemos visto en el apartado anterior, el crecimiento de las ciudades se ha basado en un incremento de la movilidad apoyado en el vehículo privado. Sin embargo, este esquema de crecimiento se ha mostrado ineficiente en los principales países occidentales a partir de los años 70, debido a los problemas medioambientales que genera y a la dependencia de la producción del petróleo, que tanto se ha notado a partir de la crisis del año 1973.

A partir de estos años se estableció en Europa un acuerdo para crear nuevos patrones de movilidad, introduciendo los términos de transporte y movilidad sostenible, en línea con el concepto de desarrollo sostenible. Se plantea la sostenibilidad como una filosofía que se basa en el principio de "satisfacer las necesidades de hoy en día sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades". Es decir, se trata de una política que se podría aplicar de forma continuada, de manera que la sociedad a la que se dirige tenga suficientes recursos para mantenerla de forma indefinida [11].

En principio, las necesidades y circunstancias de cada ciudad variarán en función de sus características, pero para ciudades de tamaño relativamente importante se puede definir el desarrollo sostenible como aquel que permita unas condiciones de vida y de trabajo dignas, donde:

- ☐ la mayoría de los ciudadanos puedan satisfacer adecuadamente la mayor parte de sus necesidades locales a pie, en bicicleta o en transporte público;
- ☐ los servicios de transporte público sean suficientes para poder satisfacer estas necesidades;
- ☐ el transporte público facilite de manera adecuada los desplazamientos de larga distancia entre los centros urbanos;
- ☐ los trayectos realizados en transporte privado paguen enteramente los costes económicos y ambientales, y
- ☐ la capacidad y la gestión del sistema de carreteras estén en equilibrio con la demanda de capacidad y la plena evaluación de los costes sociales.

De lo expuesto en el apartado anterior se deduce claramente que la situación que se da en el momento actual en Europa y, más concretamente, en España, está muy lejos de poder ser calificada como transporte sostenible.

4. EFECTOS ADVERSOS DE LA NO SOSTENIBILIDAD DEL CONJUNTO DEL TRANSPORTE

A continuación se presentan algunas de las consecuencias negativas que conlleva la primacía del vehículo privado y la consiguiente congestión que se da en la mayoría de las ciudades europeas y también de nuestro país.

4.1. ACCIDENTES

Uno de los principales problemas que se plantean en estos momentos en el transporte por carretera es el de la seguridad. Los cerca de 500 millones de vehículos existentes en el mundo ocasionan 500 000 muertos anuales y unos 15 millones de heridos por año en todo el mundo. La evaluación de los costes de accidentes en los países de la OCDE se estima en el 1,5-2% del PIB [5].

De este volumen de accidentes, un gran porcentaje se produce en zona urbana. Según datos referidos a España en 1995, el 55,5% de los accidentes con víctimas se producen en zona urbana, aunque su gravedad es menor que la de los accidentes por carretera, ya que únicamente el 18% de los muertos y el 49% de los heridos tiene lugar en los accidentes urbanos. Cabe destacar que en ciudad el 46% de los muertos y el 19% de los heridos son peatones. Tomando datos del año 2000, en España se produjeron 5 776 muertos en accidentes de tráfico, de los cuales 4 706 fueron en carretera y 1 070 en zona urbana. En el año 1998, en Europa, se produjeron 102 050 muertes en accidentes de carretera o urbanos [5, 15].

Es importante destacar que el número de accidentes en transporte público por pasajero y por kilómetro es mucho menor que en vehículo privado. Por tanto, potenciando el uso del transporte público se podría conseguir una reducción del número de accidentes y los costes que conllevan.

Entre las razones que se apuntan para explicar esta menor accidentabilidad en el transporte público destacan las siguientes:

- ☐ cumplimiento de unas normas más exigentes y conducción por parte de profesionales;
- ☐ menor velocidad de circulación (autobuses);
- ☐ mantenimiento más exigente de los vehículos;
- ☐ diseño de los vehículos orientado a la minimización de los daños causados por los accidentes.

4.2. RUIDO

En los últimos años se está produciendo un empeoramiento del medio ambiente sonoro, derivado de factores como el aumento de la urbanización, motorización y movilidad, ya comentados, así como la mecanización de gran número de actividades. Este hecho se produce a pesar de la progresiva regulación de los niveles de emisión de ruido de los vehículos a motor en la mayoría de los países desarrollados.

Los efectos del ruido en la salud son importantes. No sólo puede producir una pérdida de audición (que puede llegar a ser aguda, crónica, ...), sino que también puede interferir en numerosas tareas mentales que requieren atención, memoria y habilidad para tratar problemas analíticos más o menos complejos. Por otra parte, se sabe que el ruido contribuye de forma notable al estrés, produce un sueño menos profundo y dificultades de comunicación. En niños expuestos constantemente a un elevado nivel de ruido se observan alteraciones en la adquisición de las habilidades de la lectura, la atención y la resolución de problemas [25].

En el momento actual, en los países de la OCDE, de un 5 a un 30% de los habitantes (según países), están expuestos a más de 65 dB(A), y alrededor de un 50% de la población soporta niveles de ruido superiores a los 55 dB(A), a causa del tráfico de carretera [5].

4.3. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

El transporte en vehículo privado se basa en la utilización del motor de combustión interna, de tal manera que se utilizan hidrocarburos como combustible, ge-

nerando principalmente emisiones de CO_2 (gas emitido por el sector del transporte que en mayor medida produce el efecto invernadero), pero emitiendo también CO , SO_2 , NO_x , etc., que producen contaminación tanto a nivel local como regional.

Estos contaminantes afectan:

- ☐ Al medioambiente, produciendo acidificación de suelos y aguas, degradación de bosques, afección al patrimonio histórico de las ciudades y aumento del efecto invernadero.

Como ejemplo, se puede mencionar el hecho de que en 1995 el sector transporte representó el 26% de todas las emisiones de gases que producen el efecto invernadero en la Unión Europea. Si se tienen en cuenta también las emisiones producidas por la fabricación de vehículos y la construcción de carreteras y otras infraestructuras, la cifra real es incluso mayor. De seguir en esta línea, en la Unión Europea se espera un aumento del 40% de las emisiones de CO_2 del sector del transporte para el año 2010, en relación con los niveles de 1990 [5].

- ☐ A la salud de las personas, dando lugar a irritaciones, efectos tóxicos o cancerígenos, y disminución de la capacidad inmunitaria. Recientemente se ha comprobado que los niños que viven en zonas cercanas a carreteras con un tráfico intenso de vehículos, tienen un riesgo de padecer enfermedades respiratorias en torno al 50% superior que el de los niños que viven en zonas con poca circulación [25].

Aunque el porcentaje total de contaminantes debidos al tráfico en medio urbano varía según las ciudades, en una ciudad de tipo medio el tráfico motorizado es el responsable de la práctica totalidad de emisiones de monóxido de carbono y de plomo, del 60% de las emisiones de óxidos de nitrógeno o de dióxido de carbono y del 50% de las emisiones de partículas contaminantes [5].

4.4. EFECTOS SOCIALES

Los efectos sociales más destacables son los siguientes:

- ☐ Efectos de marginación de las personas que no tienen suficientes medios como para poseer un vehículo privado, lo que les impide acceder a numerosas actividades.
- ☐ Efecto barrera de las infraestructuras de carretera, especialmente para las personas de más edad y los discapacitados.
- ☐ Disminución de espacios de esparcimiento en las ciudades (paseos, jardines, parques, ...), debido al espacio ocupado por las infraestructuras viarias. Este hecho repercute, por una parte, en los niños, que tienen menos

espacios para jugar; y por otra, en la salud de los ciudadanos, ya que disminuye el número de peatones, lo que afecta a la salud mental y al riesgo de padecer enfermedades coronarias, diabetes, hipertensión y obesidad. El transporte público mejora esta situación, en la medida en que parte del trayecto se debe realizar andando o en bicicleta. Este hecho se desarrollará con mayor profundidad en el capítulo siguiente.

4.5. ESPACIO EN LAS CIUDADES

El espacio es un recurso escaso en las ciudades, que debe ser repartido de forma eficaz entre las actividades residenciales, comerciales, edificios públicos, calzadas y espacios abiertos. La distribución del espacio influye de forma directa en las condiciones de vida de los ciudadanos, de tal manera que la construcción de un elevado número de carreteras, el excesivo espacio para aparcamiento, y la mala gestión de las infraestructuras puede hacer que la ciudad se convierta en un espacio poco habitable y desagradable para las personas que tienen que ocuparlo.

En relación con esto, se debe destacar que el transporte público utiliza el espacio de forma más eficaz que el vehículo privado por pasajero y kilómetro. Así, el ferrocarril urbano de alta capacidad (tren de cercanías) es capaz de transportar del orden de 40 000 viajeros en una hora, a lo largo de una vía de anchura similar a la de un carril de tráfico. En este mismo espacio el vehículo privado difícilmente sería capaz de transportar a más de 2 000 viajeros por hora, según las tasas de ocupación normales en los desplazamientos al trabajo. Sin embargo, esta proporción de 20:1 es aún así generosa con el vehículo privado, ya que no se está contabilizando el espacio requerido para estacionar. Teniendo en cuenta la velocidad, densidad de tráfico y requisitos de estacionamiento, se pueden elaborar unos índices de consumo de espacio por cada medio de transporte. Para el caso de condiciones urbanas dichos índices se presentan en la tabla 1.4 [1].

Medio de transporte	Consumo de espacio (m ² ·min/pasajero·km)
Marcha	12
Bicicleta	6
Automóvil	285
Autobús en carril reservado	17
Autobús en tráfico mixto	8
Tren de cercanías	8

Tabla 1.4: Ocupación de espacio según modos.

Fuente: [1].

4.6. SENSIBILIDAD DE LA OPINIÓN PÚBLICA EUROPEA RESPECTO AL MEDIO AMBIENTE

El deterioro del medio ambiente está dando lugar a una concienciación con respecto a estos temas por parte de los ciudadanos europeos. Prueba de ello son los datos que se presentan a continuación, obtenidos del estudio *What do Europeans think about the environment?* realizado en el año 1999 por la Comisión Europea [7]:

- ☐ El 56% de los ciudadanos europeos opina que es necesario un cambio fundamental de nuestra forma de vida y desarrollo si queremos evitar el deterioro del medio ambiente.
- ☐ El 69% opina que el medio ambiente es un problema urgente e inmediato.
- ☐ El 54% no sabe muy bien qué hacer en su vida diaria para contribuir a la protección del medio ambiente.
- ☐ El 68% cree que una mejora del transporte público es la forma más adecuada para resolver de manera eficaz los problemas medioambientales relacionados con el tráfico en las ciudades.

Con estos datos queda claro que se espera un cambio y una mejora en las condiciones que dan lugar a este deterioro progresivo del medio ambiente.

5. OBJETIVO: HACIA UN TRANSPORTE SOSTENIBLE

Hasta el momento se ha presentado la evolución de la movilidad en las ciudades, se ha visto que no se está consiguiendo el objetivo de transporte sostenible, y se han estudiado las consecuencias adversas que produce este hecho. En este apartado se estudiarán los planteamientos necesarios para tender hacia un transporte sostenible.

Dado que, como se ha comentado, la opción de aumento de la oferta de infraestructuras viarias no es una buena solución ante el aumento de demanda de movilidad, la única opción razonable que se puede plantear consiste en la potenciación de los sistemas de transporte público.

Esta potenciación tiene que conseguirse mediante medidas que disuadan al individuo respecto al uso del vehículo privado. En la figura 1.2 se presentan las características positivas y negativas del transporte privado y del transporte colectivo. Es importante destacar que los aspectos positivos del coche afectan mayoritariamente al usuario y los negativos a la comunidad, mientras que en el transporte colectivo se invierten los términos, afectando las características positivas mayoritariamente a la comunidad y las negativas al usuario. Esta figura explica esta tendencia natural del individuo hacia el uso del transporte privado.

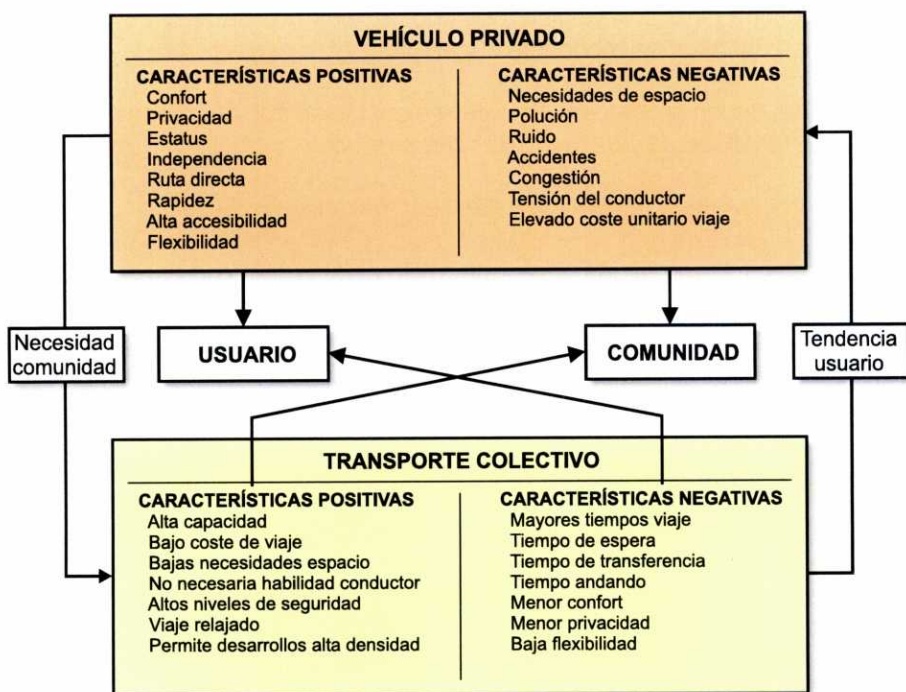


Figura 1.2: Características positivas y negativas del transporte público y privado sobre el usuario y la comunidad. Fuente: [19].

La potenciación del transporte público se puede apoyar en dos tipos de medidas diferentes: por una parte, la restricción del uso del transporte privado, con limitaciones al aparcamiento y a la circulación en los centros urbanos; y, por otra parte, la mejora de la calidad del servicio, con diferentes medidas que se expondrán a continuación.

Ya que las características del transporte público más valoradas por los ciudadanos son la velocidad comercial y la regularidad, se debe tratar de mejorar estos aspectos al objeto de atraer usuarios hacia el transporte público. Para ello se debe disponer de la mayor proporción posible de plataforma reservada. Al hilo de este razonamiento se podría concluir que la mejor solución para el transporte público en cualquier ciudad sería de tipo metro, de tal manera que la plataforma está totalmente independizada del resto del tráfico, circulando normalmente en túnel. Sin embargo, las soluciones a implantar deben ser acordes con los niveles de demanda, por lo que en el caso de demandas medias se deben evitar las soluciones demasiado caras, debiéndose establecer cierta proporción de plataforma reservada, para garantizar la velocidad comercial y la regularidad del sistema, pero circulando en superficie y con la opción de compartir la plataforma en las zonas en que sea necesario. Este caso deberá ir entonces acompañado de una relación adecuada con la regulación del resto del tráfico, obteniéndose las prioridades necesarias para garantizar la existencia de un corredor de transporte

colectivo en superficie, con velocidades comerciales razonables, y siempre superiores a las de los otros modos de superficie.

Por otra parte, desde el punto de vista de la explotación del transporte público, un aumento de la velocidad y de la regularidad produce:

- ☐ Una mejora de la frecuencia y fiabilidad del servicio;
- ☐ Una disminución de los costes de explotación, gracias a la reducción del número de vehículos en servicio y del número de vehículos de reserva para compensar los retrasos.

Sin embargo, estas medidas de potenciación del transporte público deben ir acompañadas de medidas destinadas a la disminución de la utilización del vehículo privado, debido a que la enorme demanda potencial que existe hace que cualquier mejora en las condiciones del tráfico se convierta en un incentivo para el mayor uso del coche. Por tanto, se deberá realizar, en primer lugar, una adecuada gestión del espacio urbano, con medidas que limiten el aparcamiento en el centro urbano, y con limitación también de la circulación en estas zonas, mediante peatonalizaciones y permisos sólo para residentes y para reparto de mercancías. El coche no puede seguir invadiendo espacios públicos, peatonales y ajardinados, sino que hay que recuperar dichas zonas para la vida cotidiana de los ciudadanos.

Entre las ventajas que se obtendrían con esta potenciación del transporte público se pueden citar las siguientes:

- ☐ Al disminuir el tráfico se obtendría una mejora de la calidad del aire, y una disminución del número de accidentes de circulación.
- ☐ El mayor uso del transporte público produciría una reducción del consumo de energía y del efecto invernadero producido por la emisión de gases por trayecto.
- ☐ El transporte público produce menor ocupación de espacio, menor contaminación y menor consumo de energía por pasajero transportado.
- ☐ Mejora de las condiciones de salubridad, debida, por una parte, a una disminución del ruido y de la contaminación ambiental, y por otra, a que el transporte público motiva a las personas a caminar o montar en bicicleta como parte del trayecto en los recorridos de carácter metropolitano.
- ☐ El transporte público con tracción eléctrica produce menos ruido que los vehículos accionados por motores de combustión interna, y puede adaptarse fácilmente a fuentes alternativas de energías renovables y menos contaminantes.

La Comisión Europea, en su documento “Developing the Citizen’s Network” [6], señala una serie de medidas para modificar la dependencia del vehículo privado y hacer que los sistemas de transporte sean más sostenibles. Entre dichas medidas se incluyen:

- ☐ incrementar la calidad y el acceso de los servicios de transporte público y aumentar su capacidad para responder de manera flexible a los cambios en las necesidades de transporte;
- ☐ hacer más atractivas actividades como caminar y montar en bicicleta;
- ☐ reducir la demanda de trayectos, por ejemplo, invirtiendo la tendencia a dispersarse en puntos alejados entre sí de las viviendas, los puestos de trabajo, los colegios, los centros comerciales, los centros de salud y actividades de ocio, de manera que se hace difícil el acceso si no se posee un coche;
- ☐ reconocer la continua función del coche en los sistemas de transporte local, haciendo posible a la vez la creación de un buen nivel de calidad de vida sin tener que depender de éste;
- ☐ eliminar barreras psicológicas al uso de alternativas al coche y conseguir el apoyo del público para las políticas que fomenten un mayor uso de estas alternativas;
- ☐ gestionar activamente el uso del coche en zonas congestionadas, por ejemplo, imponiendo restricciones de estacionamiento, controles de acceso o programas de peajes;
- ☐ integrar al transporte como un componente esencial en las estrategias de planificación del espacio, el desarrollo económico y la cohesión social;
- ☐ fomentar horarios de trabajo nuevos y más flexibles;
- ☐ reunir todos estos elementos para crear un sistema de transporte completo puerta a puerta que pueda ser utilizado por los usuarios como una red de ciudadanos integrada.

Para conseguir este objetivo de movilidad sostenible en las áreas metropolitanas, es muy importante tener en cuenta el espacio suburbano a la hora de establecer los sistemas de transporte público en las mismas. Salvo en casos excepcionales, en los que se crean entidades específicas para gestionar el transporte metropolitano, estas zonas no se suelen considerar a la hora de planificar el transporte público de las ciudades, dejando su demanda de movilidad confiada al vehículo privado, o a ciertas líneas de autobuses poco coordinadas con el resto del sistema. Sin embargo, es en estas zonas en las que se está produciendo un mayor crecimiento de población y de movilidad, y es donde la captación del vehí-

culo privado es muy superior al transporte público, sobre todo en los movimientos transversales.

Para dar servicio a estas zonas se deben crear nuevas infraestructuras de transporte público, menos costosas que en el centro de las ciudades, pero con una velocidad elevada, de forma que el transporte público llegue a ser competitivo con el vehículo privado. Para ello se debe investigar en nuevas tecnologías de transporte que aminoren los costes de inversión y explotación. Entre ellas, surge la opción del tranvitrén, objeto de la presente Tesis.

6. EL TRANVÍA/METRO LIGERO COMO SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS PLANTEADOS

En este apartado se tratará el concepto de metro ligero y las ventajas que presenta frente a otros sistemas de transporte público para resolver los problemas de movilidad de áreas metropolitanas de tamaño medio.

El metro ligero es un sistema de transporte público urbano ferroviario, que utiliza vehículos ferroviarios ligeros, que pueden circular independientemente o en composiciones de hasta tres unidades, con conductor, y normalmente con tracción eléctrica (aunque también existen vehículos de este tipo con tracción diesel).

Este sistema opera fundamentalmente sobre plataforma reservada, aunque existen interferencias puntuales con el resto del tráfico de vehículos y peatones en cruces a nivel. Sin embargo, estas zonas de categoría 2 (según la definición de la UITP, Union Internationale des Transports Publics) se pueden combinar con tramos de plataforma totalmente independiente (en superficie, en túnel o en viaducto), y también con tramos de plataforma compartida con el resto del tráfico, todo ello dentro de una misma ruta.

Ya se comentó en el apartado anterior que el hecho de poder disponer de plataforma reservada, unido a la adecuada regulación con el tráfico general, da lugar a un sistema de transporte colectivo de superficie con velocidades comerciales muy razonables. La combinación de estas características con otras tales como el diseño de las puertas, distancias entre paradas y capacidad de aceleración/frenado de los vehículos, entre otras, permite conseguir la regularidad y velocidad comercial necesarias para que el sistema de transporte público sea eficiente.

Su capacidad y calidad del servicio, se encuentran en un punto intermedio entre los del autobús y el metro convencional, con un amplio rango de valores posibles que dependen del grado de independencia de su plataforma con respecto al resto del tráfico.

De hecho, este tipo de sistemas surgió como un modo de transporte colectivo moderno y atractivo para el usuario, en respuesta a los problemas de movilidad en ciudades cuyos volúmenes de demanda no se pueden satisfacer en condicio-

nes aceptables por los sistemas de transporte de superficie convencionales (autobús, tranvía) y que no justifican las elevadas inversiones de un sistema de infraestructura totalmente independiente (metro o ferrocarril de cercanías convencionales).

En la tabla 1.5 se presentan las capacidades máximas (en saturación) y típicas (en funcionamiento normal de la línea) de los distintos sistemas de transporte público urbano, de tal manera que se pueden comparar los sistemas de metro ligero con los demás. Se debe destacar que estos valores son aproximados, ya que la capacidad de cada sistema está condicionada por las características particulares de las líneas y de la explotación.

Modo	Capacidad del vehículo (viaj/veh)	Vehículos por unidad (veh/TU)	Frecuencia máxima (TU/h)	Intervalo mínimo (seg/TU)	Capacidad máxima (viaj/hora)	Frecuencia típica (TU/h)	Intervalo (min/TU)	Capacidad típica (viaj/hora)
Autobús 1	65	1	120	30	7800	10	6	650
Autobús 2	100	1	80	45	8000	10	6	1000
Trolebús	100	1	80	45	8000	10	6	1000
Tranvía	140	1	90	40	12600	10	6	1400
Bus semirrápido	100	1	90	40	9000	20	3	2000
Metro ligero 1	140	1	90	40	12600	20	3	2800
Metro ligero 2	140	3	90	40	37800	20	3	8400
Metro 1	200	6	30	120	36000	15	4	18000
Metro 2	200	6	36	100	43200	15	4	18000
Ferrocarril de cercanías	250	6	30	120	45000	10	6	15000
People Mover	60	2	90	40	10800	15	4	1800

Tabla 1.5: Capacidad típica y de saturación de los sistemas de transporte público urbano.

Por otra parte, este modo se caracteriza por su gran flexibilidad en lo que se refiere a la construcción, admitiendo pendientes pronunciadas (60-80‰, incluso hasta 150‰ en redes muy antiguas) y radios de curvatura pequeños (25-30 m, incluso hasta 11 m también en redes muy antiguas) que le permiten integrarse en el viario urbano existente sin ningún problema. Sin embargo, se debe tratar de evitar la utilización de los valores extremos tecnológicamente posibles, ya que se afectaría negativamente a las prestaciones e impacto ambiental del sistema. Así, si se tienen pendientes muy elevadas, se necesitan unas prestaciones cinemáticas (tracción y frenado) demasiado altas, por lo que aumenta mucho el impacto acústico. De la misma manera, si se tienen radios excesivamente reducidos, la velocidad comercial disminuye mucho, aumenta el nivel de ruido, el desgaste de ruedas y carriles, y se limita la flexibilidad de la explotación (posibilidad de acoplamiento de unidades múltiples que necesitarían mayor radio de giro) [3, 17].

En lo que se refiere a la distancia entre paradas, ésta debe ser un compromiso entre la facilidad de acceso y reducción del tiempo andando, por un lado, y el mantenimiento de una velocidad aceptable por otro. La distancia media típica entre paradas de un sistema de metro ligero está entre los 350 y 800 m, aunque en centro urbano se puede reducir hasta 250 m, mientras que en la periferia se puede aumentar hasta alrededor de 1 000 m [19].

El hecho de que el sistema de metro ligero se plantee como una buena alternativa para resolver los problemas de movilidad en las zonas metropolitanas, se

debe, en gran medida, a las ventajas que se derivan de la utilización de la tecnología ferroviaria, como son:

- ☐ La tracción eléctrica no produce polución en las calles. Esta es una característica importante en relación con los autobuses, sobre todo en el caso de estar hablando de calles peatonales estrechas.
- ☐ La tecnología ferroviaria es más apropiada que la de los autobuses para utilizar trazados subterráneos, especialmente si se trata de autobuses diésel.
- ☐ Los metros ligeros tienen mayores capacidades que los autobuses para un nivel dado de ocupación.
- ☐ La tecnología ferroviaria, especialmente cuando se utiliza reserva de plataforma, parece ser más atractiva que los autobuses para usuarios de un nivel económico más amplio. De esta manera los metros ligeros parecen ser más atractivos para los pasajeros, especialmente para aquellos que tienen que dejar de utilizar sus coches como resultado de medidas de restricción del tráfico.
- ☐ La construcción de unas vías ferroviarias da la impresión de ser una garantía más permanente de servicio continuado que una ruta de autobús.

En la medida en que el metro ligero reduzca el uso del vehículo privado en recorridos urbanos, disminuye el uso de este viario para circulación y aparcamiento, potenciando la movilidad peatonal.

El metro ligero también presta mejores servicios en los recorridos suburbanos de las áreas metropolitanas de tamaño medio que el ferrocarril de cercanías convencional. Esto se debe a que los ferrocarriles de cercanías convencionales tienen varios problemas:

- ☐ alta capacidad de los trenes de cercanías, en el entorno de los 40 000 viajeros por sentido, lo que da lugar a un exceso de capacidad en las zonas con densidades de población demasiado bajas. En estas zonas la explotación de sistemas de transporte público por medio de ferrocarriles convencionales no resulta rentable, debido a los altos costes de explotación de este tipo de servicios;
- ☐ pocas estaciones, y por tanto, pocos usuarios que no tengan que recorrer distancias importantes para llegar a ellas;
- ☐ estaciones que no están localizadas en los lugares más apropiados para las necesidades de hoy en día;

- condiciones de trazado mucho más estrictas que las del metro ligero, por lo que no pueden penetrar en el entramado urbano en la misma medida que éstos.

El metro ligero se presenta como un intento de solucionar todas estas desventajas de los ferrocarriles de cercanías convencionales, pero manteniendo las características atractivas de confort, fiabilidad, velocidad, alta capacidad, y bajas afecciones al medio ambiente.

Es de destacar que se ha centrado el problema para el caso de ciudades de tamaño medio, con un área metropolitana relativamente grande, pero normalmente por debajo de un millón de habitantes. Por tanto, estos beneficios de los sistemas de metro ligero frente a los ferrocarriles de cercanías y a los sistemas de autobús se refieren a este caso concreto.

Sin embargo, claramente un ferrocarril de cercanías es un medio mucho más potente y apropiado que el metro ligero cuando se trata de los corredores con mayor demanda de las áreas metropolitanas de gran tamaño, por encima de la cifra citada.

Así mismo, los sistemas de autobús tienen unas prestaciones claramente satisfactorias para ciudades de tamaño pequeño, en las que la demanda, e incluso el grado de congestión, no justifican soluciones de mayor capacidad como el metro ligero.

Por otra parte, no hay que olvidar que normalmente los sistemas de transporte se complementan, de tal manera que una red de autobuses puede servir como alimentador/distribuidor de una red de metro ligero, así como el metro ligero lo puede ser para una red de metro o de ferrocarril de cercanías.

Sin embargo, para el buen funcionamiento del sistema, lo más importante no es el tamaño de la aglomeración, sino la existencia de un área de captación adecuada, que puede extenderse con la alimentación de las estaciones principales mediante autobuses y el establecimiento de aparcamientos disuasorios (park-and-ride). Según el estudio *Metro ligero. Nuevos tranvías en la ciudad* [19], realizado por el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, en 1995, un sistema de metro ligero puede funcionar con éxito con densidades de población tan bajas como 1 250 habitantes/km², y puede estar justificado para capacidades de transporte entre 2 000 y 20 000 pasajeros/hora/sentido, circunstancias que se dan en numerosas ciudades españolas, al menos en algunos corredores.

Uno de los costes más importantes en un sistema de metro ligero es el coste de adquisición del material móvil, siendo, en general, estos vehículos del orden de 4 a 5 veces más caros que los autobuses para la misma capacidad de transporte, aunque el período de amortización también es del orden de 2,5 veces más largo. Aunque normalmente el coste del material móvil es la partida menos flexible, deben adoptarse todas las medidas posibles para su reducción, evitando dise-

ños y especificaciones exigentes, que pueden elevar los costes innecesariamente. En este sentido, es interesante, por ejemplo, unificar pedidos de material móvil para varias ciudades, de tal manera que se consigue una economía de escala, así como utilizar los vehículos estándar modulares existentes en el mercado, que ofrecen un diseño personalizado pero a precios competitivos, debido a dicha modularidad.

Otro coste de gran importancia es el de las instalaciones fijas, que presentan un amplio rango de variación en función de las condiciones locales (valor del suelo, necesidades de reserva de plataforma, etc.). Una de las características más ventajosas de los sistemas de metro ligero en relación con este tema es el hecho de que pueden ir mejorándose por etapas, a medida que la demanda lo justifica, pudiendo incrementarse progresivamente el grado de reserva de la plataforma, con eliminación de cruces a nivel, soterramientos parciales, etc., lo que permite empezar con un sistema de bajo coste inicial.

Aún así, el coste del sistema es uno de los mayores inconvenientes cuando se compara con sistemas de autobús urbano. Y, por otra parte, puede ser una de las limitaciones principales para su implantación en el caso de ciudades de tamaño intermedio, que no tienen presupuesto suficiente para abordar el establecimiento de un sistema de transporte muy costoso, pero que sufren graves problemas de congestión, sobre todo en las principales vías de entrada y salida del centro urbano, en horas punta, debido a los movimientos hacia y desde el trabajo o los centros de estudio por parte de la población asentada en el área metropolitana.

Para tener una idea de los costes de un sistema de metro ligero de nueva creación, se puede considerar el ejemplo de Estrasburgo, en el que se creó un sistema de metro ligero de 12,6 km de vía completamente nuevos, con 23 paradas y con 24 vehículos en servicio. El coste total del sistema ascendió a 320 millones de euros, lo que supone un coste por kilómetro de 25 millones de euros [21].

Una forma de conseguir un sistema de metro ligero, con un gran porcentaje de reserva de plataforma y todas las ventajas que, como se ha comentado, conlleva, de regularidad, velocidad comercial y calidad del servicio, pero con menores costes por kilómetro de línea, es la utilización de corredores ferroviarios ya existentes en la región, de tal manera que el vehículo de metro ligero circula por sus propias líneas en el centro urbano, y por las líneas ferroviarias convencionales existentes en el área metropolitana.

De esta manera se consiguen conexiones directas de metro ligero con dicha zona, pero evitándose la construcción de gran cantidad de kilómetros de nuevo trazado, con el ahorro que esto conlleva. Para poder realizar una comparación de costes con el caso de Estrasburgo, se puede utilizar el ejemplo del sistema de Saarbrücken, con 44 km de vías en servicio, de los que sólo 15 km son de nueva creación, con 47 paradas y con 28 vehículos, cuyo coste total ha sido de 270 millones de euros, es decir, 6,2 millones de euros por kilómetro, lo que supone

del orden de la cuarta parte del coste por kilómetro del sistema de metro ligero de Estrasburgo [21].

La posible aplicación a España de esta tecnología, que se ha dado en llamar tranvitren ("tram-train" en inglés), y la resolución de todos los problemas que conlleva, será el objeto de la presente Tesis.

REFERENCIAS

- [1] BAYLISS, D., El desarrollo urbano y sus consecuencias para la movilidad, en *El reto de la movilidad urbana*, Bruselas: UITP (Union Internationale des Transports Publics), 2000, p. 1-32.
- [2] BOVY, P.H., Planificación integrada “urbanismo-transporte” y desarrollo sostenible de las movilidades, en *El reto de la movilidad urbana*, Bruselas: UITP (Union Internationale des Transports Publics), 2000, p. 98-133.
- [3] BUGARÍN, M.R., ORRO, A., Sistemas ferroviarios ligeros, *Revista OP Ferrocarril y ciudad*, 1998, nº 45, p. 102-111. ISSN: 0213-4195
- [4] CEMT (Conferencia Europea de Ministros de Transporte). *Transports urbains et développement durable*, París: CEMT-OCDE, 1995.
- [5] COLOMER, J.V., REAL, J.I., Movilidad y ambiente en las ciudades. Soluciones en Europa, en *El transporte público en las áreas metropolitanas: experiencias españolas*, Valencia: editores J. Colomer, R. Insa y J. Real, 2002, p. 17-60. ISBN: 84-600-9819-2.
- [6] COMISIÓN EUROPEA, *Developing the citizen's network*, Com(98)431, 1996. ISBN: 92-827-5812-5.
- [7] COMISIÓN EUROPEA, *What do Europeans think about the environment?*, Luxemburgo: Oficina para las publicaciones oficiales de la Comunidad Europea, 1999. ISBN: 92-828-7270-X
- [8] COMISIÓN GENERAL “TRANSPORTE Y CIUDAD” de la UITP, *Desplazarse mejor en la ciudad*, Bruselas: UITP (Union Internationale des Transports Publics), 2001.
- [9] CRISTÓBAL, C., Movilidad sostenible: un tema crucial para las autoridades de transporte, en *El reto de la movilidad urbana*, Bruselas: UITP (Union Internationale des Transports Publics), 2000, p. 64-77.
- [10] DE LA RICA, S., La congestión del tráfico en Madrid, en *Los problemas del transporte metropolitano. Un análisis de casos*, Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1993, p. 61-68. Serie Monografías. ISBN: 84-7433-956-1.
- [11] DÓMINE, V., El metro de Valencia: realidad actual y proyectos de futuro, en *El transporte público en las áreas metropolitanas: experiencias españolas*, Valencia: editores J. Colomer, R. Insa y J. Real, 2002, p. 217-226. ISBN: 84-600-9819-2.
- [12] DURÁN, M., Análisis comparativo de algunas experiencias del transporte urbano: el caso de Sevilla, en *Los problemas del transporte metropolitano. Un análisis de casos*, Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1993, p. 47-58. Serie Monografías. ISBN: 84-7433-956-1.
- [13] EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Energy and Transport, *European Union energy and transport in figures 2002*, Bruxelles, 2002.
- [14] GUERRERO, M.J., MONZÓN, A., *Cuenta económica y socio-ambiental del transporte terrestre de viajeros de la Comunidad de Madrid en 1996*, Madrid: Consorcio Regional de Transportes de Madrid, 2003. ISBN: 84-86803-49-7.

- [15] INSA, R., El transporte ferroviario en las áreas metropolitanas: el servicio de cercanías, en *El transporte público en las áreas metropolitanas: experiencias españolas*, Valencia: editores J. Colomer, R. Insa y J. Real, 2002, p. 159-178. ISBN: 84-600-9819-2.
- [16] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, *Base de datos INEbase*, Madrid, 2003.
- [17] MARISCAL, M., PASTOR, F., *Metros ligeros: una apuesta por la calidad y mejora de los transportes públicos. Su aplicación a las ciudades españolas*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1993.
- [18] MINISTERIO DE FOMENTO, *Anuario Estadístico 2001*, Madrid, 2002.
- [19] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE, *Metro ligero. Nuevos tranvías en la ciudad*, Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1995. Serie Monografías. ISBN: 84-498-0145-1.
- [20] MONZÓN, A., Costes externos del transporte urbano, en *Los problemas del transporte metropolitano. Un análisis de casos*, Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1993, p. 69-77. Serie Monografías. ISBN: 84-7433-956-1.
- [21] PETZ, M., Tram-train vs. train-tram, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 2002.
- [22] PORTILLO, L., AZANZA, J., Coordinación del transporte en áreas metropolitanas. El caso de Bizkaia, en *El transporte público en las áreas metropolitanas: experiencias españolas*, Valencia: editores J. Colomer, R. Insa y J. Real, 2002, p. 135-144. ISBN: 84-600-9819-2.
- [23] ROCA, C., El transporte público ligero en Valencia, en *Los problemas del transporte metropolitano. Un análisis de casos*, Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1993, p. 25-35. Serie Monografías. ISBN: 84-7433-956-1.
- [24] SIMPSON, B.J., *Urban public transport today*, Oxford: E & FN Spon, 1994. ISBN: 0-419-18780-4.
- [25] TORODE, R., La movilidad sostenible: un instrumento para mejorar la calidad de vida y contener la exclusión social, en *El reto de la movilidad urbana*, Bruselas: UITP (Union Internationale des Transports Publics), 2000, p. 33-62.
- [26] UNITED NATIONS, *World urbanization prospects. The 2001 revision*, New York: United Nations Publication, 2002. ISBN: 92-1-151371-5.
- [27] VUCHIC, V.R., *Urban public transportation. Systems and technology*, New Jersey: Prentice-Hall, 1981. ISBN: 0-13-939496-6.

Capítulo 2

EL TRANVITRÉN

I. INTRODUCCIÓN

Como se concluía en el capítulo anterior, los sistemas de metro ligero constituyen una solución muy apropiada a los problemas de movilidad de las ciudades de tamaño intermedio. Esto es debido a que, en función del grado de reserva de plataforma, se consiguen muy buenas prestaciones en materia de calidad y capacidad del servicio, lo que influye favorablemente en el atractivo del mismo, y en su aceptación por parte de los potenciales usuarios.

Además de esta cualidad, se citaba como ventaja de los sistemas de metro ligero la flexibilidad que poseen, en los dos aspectos siguientes:

- ☐ Por una parte, pueden adaptarse a cualquier tipo de trazado por el centro de la ciudad, compartiendo la plataforma con el tráfico rodado en las zonas en que sea necesario
- ☐ Y, por otra, permiten soportar las puntas de demanda, al poder modificarse las frecuencias y el tamaño de las composiciones.

Sin embargo, frente a la gran cantidad de ventajas que presentan estos sistemas, se planteaban también los principales inconvenientes, que son, por una parte, el elevado coste de implantación del sistema, tanto en lo que se refiere a la ejecución de la infraestructura, como a la adquisición del material móvil y, por otra parte, el espacio que se debe ocupar si se pretende obtener un alto porcentaje de plataforma reservada, necesario para conseguir una calidad apropiada del servicio. Este segundo problema se podría resolver mediante una solución subterránea, de tipo metro, pero su coste es excesivamente caro si no está orientado a satisfacer grandes demandas.

Así, estos dos inconvenientes hacen a veces inabordable la implantación de un sistema de metro ligero, sobre todo cuando se compara con un servicio de transporte público basado en líneas de autobús, cuyos costes de material móvil son mucho menores que los del metro ligero y tienen unos costes de inversión en infraestructura muy reducidos.

Sin embargo, como se ha mostrado en el capítulo 1, si se logran salvar los inconvenientes citados y se consigue la implantación de un sistema de metro ligero, se pueden obtener consecuencias muy positivas para la calidad de vida de la ciudad, tanto por el cambio de usuarios del vehículo privado a este nuevo sistema de transporte, que redundaría en una disminución de la congestión, como por la influencia positiva en el medio ambiente urbano que se conseguiría con este sistema.

En el capítulo primero ya se apuntaba que una forma de salvar dichos inconvenientes se basa en la implantación de sistemas de tranvitrén. En este capítulo se explicará en qué consisten estos sistemas y cuáles son las principales ventajas que se consiguen con su aplicación.

2. ¿QUÉ ES EL TRANVITRÉN?

Los sistemas de tranvitrén son sistemas de metro ligero cuya circulación por la ciudad se realiza de manera habitual, por vías de tipo tranviario, pero en un momento dado entran a circular por vías ferroviarias existentes en la región, prolongando así sus servicios hacia la periferia sin necesidad de crear nuevas infraestructuras específicas para metro ligero.

De esta forma se consiguen servicios directos de tipo metro ligero desde las zonas periféricas hacia el centro urbano y viceversa, sin necesidad de realizar transbordos, de tal manera que aumenta sustancialmente el atractivo para los usuarios del vehículo privado. Este hecho se debe a los siguientes motivos:

- ❑ Por una parte, dado que los sistemas de tipo tranvitrén evitan el transbordo, se elimina la valoración negativa que estos conllevan por parte de los usuarios (debido a la incertidumbre y la espera que implican).
- ❑ Por otra parte, debido a que el servicio se realiza de forma directa, se disminuye el tiempo de recorrido puerta a puerta, que se hace comparable al del vehículo privado.

Esta disminución del tiempo de recorrido puerta a puerta se debe, por una parte, a que se evitan las esperas en los transbordos y, por otra, a que se disminuyen las distancias entre paradas en las zonas ferroviarias, creando nuevas paradas para el servicio de tranvitrén.

Podría pensarse que el hecho de aumentar el número de paradas en las zonas ferroviarias debe dar lugar a un aumento en el tiempo de recorrido con respecto a la situación de partida, pero este no es el caso debido a que, gracias a la explotación de las líneas con vehículos de tipo tranvitrén, con tecnología básicamente de metro ligero, se obtienen unas prestaciones de aceleración y frenado mucho mejores que las correspondientes a los vehículos ferroviarios convencionales, por lo que se puede aumentar el número de paradas en zona ferroviaria sin aumentar en gran medida, e incluso en ocasiones disminuyendo, el tiempo de recorrido en estos tramos. La forma de conseguir esta reducción de tiempo se ilustra en la figura 2.1.



Figura 2.1: Disminución del tiempo de viaje aumentando el número de paradas.

Por tanto, aumentando el número de paradas en zona ferroviaria se consigue un aumento del área de captación y una disminución del tiempo de

recorrido desde el origen/destino del viaje hasta la parada de transporte público.

La prolongación de servicios de tranvitrén por las líneas ferroviarias no implica el cese de los servicios ferroviarios existentes en las mismas, por lo que se produce una situación en la que los vehículos ferroviarios convencionales comparten la vía con vehículos de metro ligero, cuyas características son totalmente diferentes.

La diferencia fundamental entre ambos sistemas radica en el tipo de operación de cada uno de ellos. En este sentido, los vehículos de metro ligero convencional o tranvía están caracterizados por el hecho de que son capaces de circular “a la vista” ligados con el tráfico urbano y/o en vías segregadas, lo que conlleva una relativamente baja velocidad máxima, elevadas prestaciones de aceleración y frenado, y una construcción ligera. Por su parte, los vehículos ferroviarios convencionales circulan normalmente por vías segregadas, sin apenas interferencias con otros modos de transporte (salvo en los pasos a nivel), y separados unos de otros por medio de un sistema de bloqueo y señalización. Los desvíos y las señales se controlan desde un puesto de mando, siendo, en general, imposible moverlos de manera independiente gracias a los enclavamientos. Este nivel de control proporciona un régimen de explotación muy seguro, que permite una relativamente alta velocidad máxima y admite bajas prestaciones de aceleración y frenado, lo que limita el número de paradas en el trayecto. Por otra parte, la reserva de plataforma del ferrocarril convencional permite una gran capacidad de transporte.

Además de esta diferencia fundamental, existen muchas otras en los diversos ámbitos técnicos que intervienen en los sistemas ferroviarios de transporte de pasajeros, y que son, entre otros, los siguientes:

- ☐ Resistencia estructural de la caja
- ☐ Alimentación eléctrica
- ☐ Sistemas de seguridad y comunicaciones
- ☐ Acceso de viajeros
- ☐ Perfil de llanta
- ☐ Gálibos
- ☐ Compatibilidad de circulaciones de distintas funcionalidades.

El objeto de la presente Tesis es el establecimiento de unas recomendaciones técnicas para la implantación de sistemas de tranvitrén en España, en el caso particular de las vías ferroviarias de FEVE. En el desarrollo de estas recomenda-

ciones se tratará de abordar las diferencias técnicas entre los sistemas de metro ligero y ferrocarril convencional de FEVE, estudiando los problemas que estas diferencias implican, y tratando de determinar las soluciones más apropiadas para el caso particular considerado.

Para la implantación de sistemas de tipo tranvitrén, además de la resolución de los problemas técnicos citados, será necesario resolver otras cuestiones de tipo administrativo, legislativo, económico y de operación. Estos temas, aunque de gran importancia en el desarrollo de un proyecto de este tipo, no son el objeto de esta Tesis, que se centrará, como su título indica, en los aspectos tecnológicos de la implantación del sistema de tranvitrén.

3. TÉRMINOS TRANVITRÉN Y TREN-TRANVÍA

El tipo de sistema del que se trata apareció por primera vez en Alemania, concretamente en la ciudad de Karlsruhe, en septiembre de 1992. Sin embargo, es a partir de su implantación en otra ciudad alemana, Saarbrücken, en el año 1997, cuando se empiezan a conocer este tipo de sistemas en toda Europa.

La empresa fabricante del vehículo de tranvitrén de Saarbrücken, Bombardier, bautizó este vehículo como *tram-train*, en inglés, para darlo a conocer en el resto de Europa, al objeto de ampliar las posibilidades de su comercialización.

A medida que se ha ido extendiendo este concepto se le ha dado diferentes nombres en diferentes idiomas, estando entre los más utilizados los siguientes: *dual-mode vehicle*, *twin-purposes vehicle*, *shared track vehicle*, *Zweisystem-Stadtbahnwagen*, *RegioStadtBahn*, *Mehrsystem*.

La traducción literal del término *tram-train* al español sería tranvía-tren, sin embargo, los términos que han tenido mayor aceptación en España han sido los de tranvitrén y tren-tranvía.

En ciertas ocasiones se ha recalcado que el término inglés es *tram-train*, y no *train-tram*, debido al hecho de que se trata de un tranvía que entra en las líneas ferroviarias, y no del sistema contrario, en el que un tren entra en las líneas tranviarias. Este segundo caso existe también en la ciudad alemana de Zwickau, aunque ha tenido menor repercusión, por lo que en esta Tesis no se estudiará en detalle, aunque sí se explicarán sus características principales.

Por tanto, a lo largo de esta Tesis se utilizará la palabra tranvitrén, haciendo referencia al sistema que se ha comentado, utilizando la expresión tren-tranvía solamente cuando se haga referencia al sistema de tipo Zwickau.

4. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE TRANVITRÉN

Aunque a medida que se han descrito las características de los sistemas de tranvitrén ya se han ido apuntando algunas de sus ventajas, se considera interesante realizar una recapitulación de todas ellas en esta sección. Para ello, se organizan las ventajas en tres apartados, el primero de ellos concerniente a temas presupuestarios, el segundo a los usuarios y el tercero a la comunidad. A continuación se presentan cada uno de ellos.

4.1. VENTAJAS ECONÓMICAS

- ☐ Se mejora el aprovechamiento de las infraestructuras ferroviarias convencionales existentes, reduciéndose las necesidades de inversión en nuevas infraestructuras.
- ☐ Se puede evitar la construcción de largas secciones de vía en la creación de nuevas líneas, con lo que se consiguen ahorros considerables, ya que se obtiene un sistema con un coste por kilómetro mucho menor que el del metro ligero de nueva implantación.
- ☐ Se obtienen ingresos adicionales en la explotación respecto a la situación de partida, en la que la explotación se realizaba por medio de vehículos ferroviarios convencionales en la zona regional, con transbordo a los sistemas de transporte urbano en la estación de trenes.

Estos ingresos adicionales se deben al aumento del número de viajeros, por lo que se necesitarán menos subvenciones para cubrir los presupuestos anuales de explotación.

Este aumento del número de viajeros está producido, por una parte, por el aumento de estaciones, por el mejor intercambio con el sistema urbano y por las conexiones más directas con las zonas residenciales y de empleo. Por otra parte, dicho aumento también se produce por la mayor calidad y mejor imagen del sistema de metro ligero, que produce una predisposición de los usuarios del vehículo privado a cambiar a este modo sin tener una sensación de “pérdida”.

- ☐ Menores costes de operación de los vehículos del tipo metro ligero en comparación con el material móvil ferroviario clásico.

4.2. VENTAJAS PARA LOS USUARIOS

- ☐ Ahorro de tiempo para los usuarios del transporte público, ya que el tranvitrén alcanza velocidades comerciales por encima del doble de las de los servicios de autobús paralelos. El tiempo de puerta a puerta del desplazamiento se hace comparable al del vehículo privado, dado que se reducen

los tiempos de circulación entre estaciones, debido a los valores de aceleración y frenado de los vehículos ferroviarios ligeros en comparación con los convencionales. También influyen los tiempos de parada más cortos en las estaciones, debido a la facilidad para la entrada y salida rápidas de los viajeros, gracias al número y disposición de las puertas laterales de acceso al vehículo. Por último, también se evitan las esperas de los intercambios modales.

- ☐ Acceso directo desde las zonas periféricas de la región hasta los principales centros de empleo y comerciales en la ciudad, y viceversa, sin necesidad de realizar intercambios modales en la estación principal del ferrocarril, como ocurre antes de la introducción de estos servicios.
- ☐ Alta fiabilidad en el cumplimiento de los horarios, al tratarse de un modo que no se ve afectado por las incidencias del tráfico rodado, por su gran porcentaje de plataforma reservada.
- ☐ Mayor confort, debido, en general, a un diseño del interior del vehículo mejor adaptado a la demanda a satisfacer, y a las características dinámicas mejoradas, que hacen que la rodadura sea más suave.
- ☐ Facilidad de utilización, ya que la implantación de este tipo de explotación suele ir acompañada de una mejora de los sistemas de información al usuario, con la colocación de dispositivos electrónicos de información en las paradas. En estos dispositivos, operados desde el centro de control, se especifica la hora de llegada del siguiente vehículo, así como las paradas a las que sirve y el tiempo de espera.
- ☐ Integración tarifaria, ya que es habitual que se cree una entidad que se encarga de la planificación y coordinación de los horarios y tarifas del transporte público urbano y regional, para facilitar su uso por los clientes.
- ☐ Mayor cercanía de las estaciones, ya que, por lo general, se aumenta el número de paradas de la zona anteriormente explotada únicamente por el ferrocarril, lo que hace que este sistema sea más permeable, aumentando por tanto la accesibilidad territorial de la zona por la que circula.
- ☐ En general, mayores frecuencias del servicio de tranvitrén en comparación con el servicio anterior de ferrocarril clásico, lo que reduce los tiempos de espera en las paradas.

4.3. VENTAJAS PARA LA SOCIEDAD

- ☐ Menor congestión en la red viaria local.
- ☐ Disminución de las necesidades de inversión en construcción y mantenimiento de carreteras.

- ☐ Menor impacto ambiental
- ☐ Ahorros en el coste de aparcamiento.
- ☐ Ahorros en los costes debidos a la accidentabilidad.

REFERENCIAS

- [1] PETZ, M., Tram-train vs. train-tram, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 2002.
- [2] ROCA, C., El transporte público ligero en Valencia, en *Los problemas del transporte metropolitano. Un análisis de casos*, Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1993, p. 25-35. Serie Monografías. ISBN: 84-7433-956-
- [3] UITP Light Rail Committee, *Track Sharing*, Montpellier: Union Internationale des Transports Publics, Julio 2001.

Capítulo 3

EXPERIENCIAS INTERNACIONALES

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará, sin ánimo de ser exhaustivo, un resumen de los principales sistemas de tranvitrén y tren-tranvía existentes en la actualidad, así como de los sistemas en fase de proyecto o anteproyecto, con más posibilidades de desarrollarse en el futuro.

Así mismo, se presentarán unas tablas que tratarán de recoger el gran número de ciudades en las que se ha planteado la implantación de un sistema de este tipo, aunque sin haber establecido un compromiso con unos plazos concretos. Nuevamente, estas tablas no tratarán de ser exhaustivas, y simplemente se presentan para dar una idea de la gran repercusión que están teniendo este tipo de explotaciones.

2. SISTEMAS DE TRANVITRÉN EN ALEMANIA

Las primeras explotaciones de tranvitrén han aparecido en ciudades alemanas, siendo este país el primero en desarrollar una norma para la compatibilización de sistemas tranviarios con sistemas ferroviarios convencionales. Esta norma es la "*Einsatz von Stadtbahn-Fahrzeugen im Mischbetrieb nach BOStrab und EBO*", de Julio de 1995. La traducción de su título sería "Recomendaciones para la operación de ferrocarriles urbanos en explotación mixta conforme a la BOStrab y a la EBO". Esta norma ha sido elaborada por la Comisión de Construcción de Ferrocarriles y la Comisión de Vehículos Ferroviarios, y ha sido encargada por la Asociación de Empresas de Transporte Alemanas (VDV).

2.1. KARLSRUHE

2.1.1. Introducción

Karlsruhe es la segunda ciudad más importante del estado alemán de Baden-Württemberg, y el centro de las autoridades administrativas y de la sede de la Alta Corte Federal de Justicia (*Bundesverfassungsgericht*). Asimismo, en la ciudad existe una universidad técnica.

El área metropolitana de Karlsruhe tiene una población de 550 000 habitantes, que se reparten en 350 000 en el centro y 275 000 en el resto del área metropolitana [2].

2.1.2. Situación previa a la aparición del tranvitrén

El antecedente principal para la aparición del sistema de tranvitrén en Karlsruhe se basa en la creación de un sistema de transporte público hacia Neureut, en 1974, utilizando un tramo de la línea de vía única de la DB (*Deutsche Bundes-*

bahn, Ferrocarriles Federales) Karlsruhe-Leopoldshafen, en la que se había suprimido el tráfico de viajeros en 1967. Para ello, se eliminan todas las circulaciones ferroviarias clásicas sobre esta línea, y se llega a un acuerdo entre la DB y la autoridad municipal de Karlsruhe, en los siguientes términos:

- ☐ el tramo de la línea sigue siendo propiedad de la DB;
- ☐ las instalaciones de seguridad y de señalización se ponen en servicio y se explotan por la autoridad municipal de Karlsruhe;
- ☐ la autoridad municipal de Karlsruhe deberá encargarse de la renovación de vías, de la electrificación en 750 V CC y de la construcción de estaciones nuevas;
- ☐ la autoridad municipal de Karlsruhe asegura, con la ayuda de su empresa Transportes Públicos de Karlsruhe (la VBK, *Verkehrsbetriebe Karlsruhe*), el transporte de viajeros sobre el tramo de línea tratado, y debe pagar a la DB un derecho de paso;
- ☐ la explotación de la nueva línea debe respetar el reglamento ferroviario (EBO, *Eisenbahnbetriebsordnung*).

Esta nueva línea es explotada por la empresa AVG (*Albtal-Verkehrs-Gesellschaft*), que en el año 1995 tenía a su cargo una red de 62,8 km de vías.

2.1.3. Motivación de la aparición del tranvitrén

El éxito de dicha línea (llamada línea del Hardt), circulando en parte sobre líneas de ferrocarril convencional sin tráfico transformadas, hizo que a principios de los años 80 la empresa de transporte público se plantease nuevas expansiones. Así, se definió el corredor hacia Bretten (*Kraichgaubahn*), aproximadamente 35 km al noreste, como una línea atractiva para un servicio de tipo metropolitano, debido al crecimiento de las ciudades afincadas en torno al mismo.

Sin embargo, la DB no tenía la intención de explotar un servicio de este tipo sobre esta línea, ya que estaba limitada, por una parte, por el viejo material móvil del que disponía, y, por otra, por la estructura de su red. El factor determinante que hacía que este corredor no resultase atractivo para su explotación por la DB radicaba en el hecho de que la estación principal de Karlsruhe se encuentra situada en la periferia de la ciudad, a unos 2 km al sur del centro urbano. Esto hacía que los viajeros que usasen la línea para llegar al centro urbano debían hacer un transbordo en la estación de ferrocarril, con la incomodidad que esto supone, ya que tenían que hacer largos recorridos por la estación y subir escaleras para llegar a la parada del tranvía (situada a distinto nivel que los andenes ferroviarios), esperar más tiempo a la llegada del vehículo, y pagar un nuevo billete para el tranvía (debido a la falta de integración tarifaria entre los dos operadores). Todos estos inconvenientes hacían que los recorridos en vehículo pri-

vado resultasen mucho más eficientes en tiempo y más convenientes para las personas que realizaban este viaje con regularidad. De esta forma, la demanda de esta línea sería excesivamente baja como para que el servicio resultase rentable a la DB.

Debido a esta situación, la participación modal del transporte público en las líneas regionales de la DB, para las que era necesario realizar el transbordo para llegar al centro urbano, no llegaba al 10%, con una clara tendencia a la baja. Este hecho contrastaba con porcentajes entre un 30 y un 40% de participación del transporte público en la zona urbana [2].

Pero, por otra parte, y al contrario de lo que había ocurrido en la línea del Hardt, la DB no quería renunciar totalmente a la explotación de su línea hacia Bretten, ya que seguía utilizándola para la explotación de servicios de larga distancia.

Por tanto, para establecer un servicio de transporte público metropolitano sobre esta línea de la DB se hacía necesaria la utilización de vehículos especiales que circularan tanto por las vías del ferrocarril convencional como por las del tranvía. Para ello se debía, por una parte, desarrollar la tecnología apropiada, y por otra, establecer el acuerdo político entre las comunidades situadas a lo largo de la línea.

2.1.4. Desarrollo del proyecto

El proceso político previo al desarrollo del proyecto se prolongó durante cierto tiempo, ya que se tenían que poner de acuerdo todos los implicados: la AVG, la DB, las agencias de financiación a nivel federal y del Land, así como las ciudades de Karlsruhe y Bretten, la entidad Walzbachtal (que comprende a las ciudades situadas a lo largo de la línea) y el Landkreis Karlsruhe (equivalente a la "provincia" de Karlsruhe).

Los primeros debates comenzaron en 1983, pero el contrato final no se firmó hasta Octubre de 1988. Las cuestiones más discutidas fueron:

- ☐ la adjudicación de los costes de la infraestructura y del material móvil entre las partes, en particular Bretten y Walzbachtal;
- ☐ la fijación de ingresos entre la AVG y la DB;
- ☐ y la definición exacta de la línea.

Una vez obtenido este acuerdo, el Ministerio de Investigación y Tecnología alemán realizó un estudio, desde el punto de vista tecnológico, sobre el problema de compartir vías entre el metro ligero y el ferrocarril convencional. Este estudio se llevó a cabo entre 1984 y 1985. Como condiciones previas que debían cumplirse para que este sistema con vías compartidas funcionase figuraban las siguientes:

- ❑ Debían utilizarse vehículos que pudieran circular por las vías del metro ligero en el área urbana y por las vías del ferrocarril convencional de la DB en el ámbito regional. Se debía garantizar la compatibilidad del material rodante así como la seguridad.
- ❑ Se debían cumplir dos normas distintas, como son las Reglamentaciones alemanas para construcción y explotación de tranvías (*Verordnung über den Bau und Betrieb der Strassenbahnen - Strassenbahn-Bau-und-Betriebsordnung, BOStrab -*) y las Reglamentaciones alemanas para la construcción y explotación de ferrocarriles (*Eisenbahn-Bau-und-Betriebsordnung, EBO*).
- ❑ Era necesario conectar las dos redes.
- ❑ La nueva red debía incorporar la construcción de nuevas paradas a lo largo de las líneas de ferrocarril convencional existentes.

El 27 de septiembre de 1992 comenzó la explotación de la primera línea VBK/DB, Karlsruhe-Bretten-Gölshausen, con diez automotores bisistema. Esta es la primera ruta en la que se compartieron vías con el ferrocarril convencional, en un tramo de 21 km. Para poner en marcha este servicio fue necesario acometer las siguientes obras:

- ❑ Conexión entre la línea de tranvía y la ferroviaria: el metro ligero comienza en Karlsruhe en la Albtalbahnhof, y circula como un tranvía regular en dirección a Durlach, pasando por la Estación Principal, la Plaza del Mercado, la zona peatonal, y la Universidad (véanse las figuras 3.1 y 3.2). Al nivel de la estación de Durlach deja la red de tranvía y, a través de una rampa de nueva construcción, entra directamente en la estación de la DB AG de Durlach.
- ❑ Instalación en la estación de Durlach de un bucle terminal para tranvías, para mejorar la transferencia de pasajeros desde otros trenes de la DB AG, como por ejemplo los trenes procedentes de Heidelberg o Pforzheim, al sistema tranviario.
- ❑ Construcción de una nueva vía gemela paralela a la de la DB AG, desde Durlach hasta Grötzingen, ya que esta sección está demasiado cargada por el tráfico de mercancías y por los trenes expresos. Esta nueva sección incorpora también el punto de cambio de sistema de alimentación, cuyo funcionamiento se explicará en otro capítulo.
- ❑ Construcción de ocho nuevas paradas en la línea de la DB AG de Grötzingen a Gölshausen, para mejorar la accesibilidad desde las zonas comerciales y residenciales. Estas paradas están provistas de un pulsador que permite a los viajeros accionar una señal luminosa que avisa al conductor del vehículo de que debe parar.

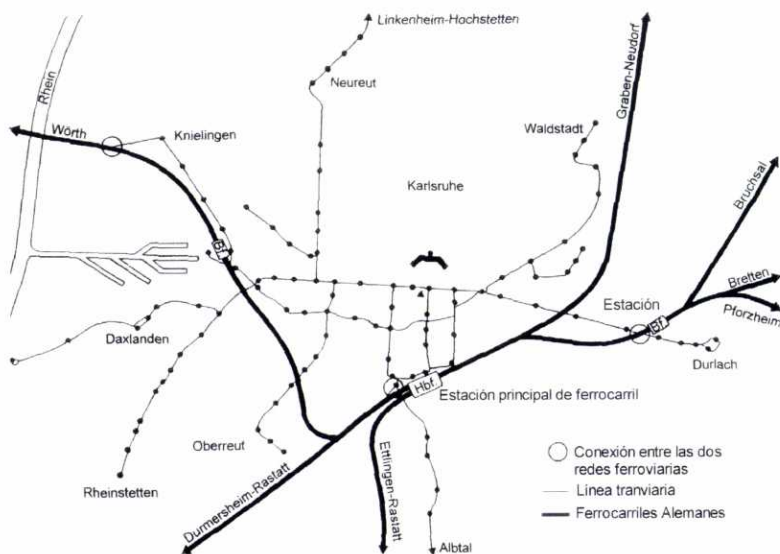


Figura 3.1: Red ferroviaria en el centro de Karlsruhe.

Fuente: [15].

- ❑ Construcción de una nueva parada, llamada “Centro Urbano”, cerca de la zona peatonal de Bretten [15].

Con este primer servicio, se produjeron varios cambios significativos en el transporte público de la zona:

- ❑ líneas diametrales atravesando el centro de la ciudad;
- ❑ menores intervalos entre trenes (cada 30 minutos en hora punta y todas las horas en períodos valle);
- ❑ más paradas sobre las líneas de la DB;
- ❑ velocidad comercial relativamente elevada;
- ❑ sistema tarifario más sencillo (dado que el servicio es explotado por una única empresa);
- ❑ integración de la red de autobús local en Bretten;
- ❑ supresión de los servicios paralelos de autobús con velocidad comercial más baja;
- ❑ provisión de instalaciones de estacionamiento disuasorio para coches y bicicletas.

Debido al gran éxito de la primera línea, la red ha estado en continua expansión desde su apertura, produciéndose las siguientes ampliaciones: 1994: Karlsruhe – Bruchsal, Bruchsal – Bretten y KA – Baden-Baden; 1996: Verknüpfung Albtalbf y Bruchsal – Menzingen; 1997: Karlsruhe – Pforzheim, Karlsruhe – Wörth, Bretten – Eppingen y Karlsruhe – Stutensee; 1998: Bruchsal – Odenheim; 1999: Pforzheim – Bietigheim, Bretten – Mühlacker y Eppingen – Heilbronn; 2001: Centro urbano de Heilbronn; 2002: Karlsruhe – Forbach y Pforzheim – Wildbad.

A finales del año 2002, la apariencia de la red de Karlsruhe era la que se presenta en la figura 3.2.

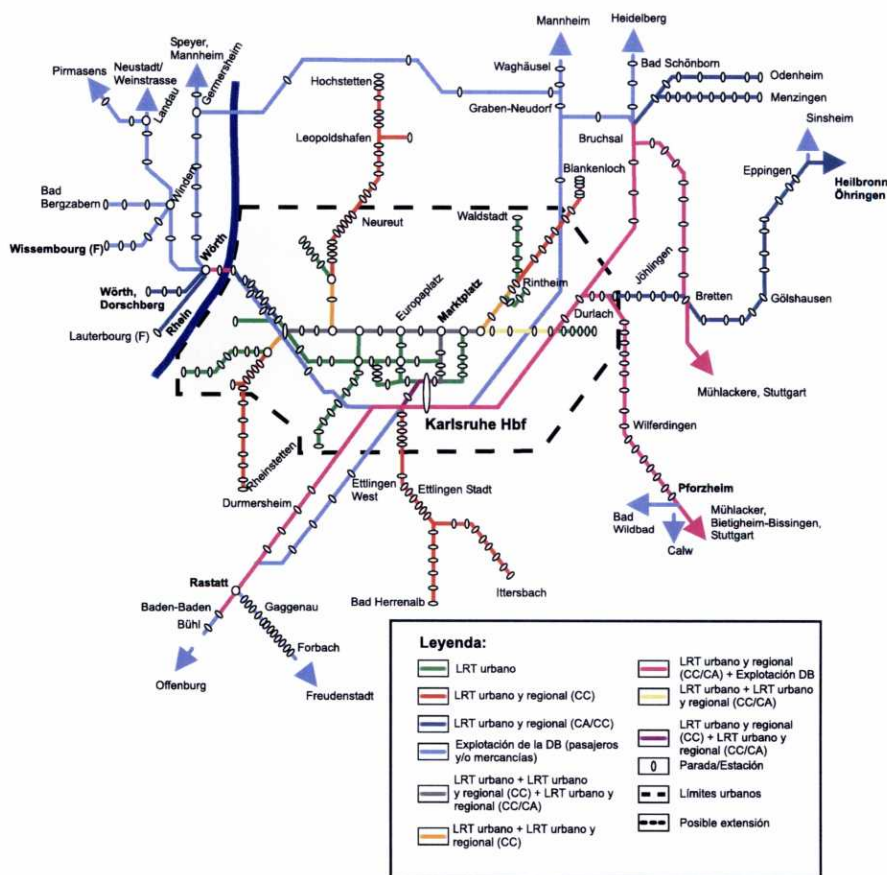


Figura 3.2: Red de Karlsruhe (tranvía, ferrocarril, tranvitrén).

Fuente: [29].

En el momento actual, la red de Karlsruhe tiene las siguientes características:

- ☐ 10 líneas de tranvitrén;
- ☐ 6 líneas de tranvía;

- ☐ 460 km de red ferroviaria tranviaria, de los cuales 60 km son de tranvía, 100 km de la AVG, 150 km de la DB, y 150 km de vías alquiladas;
- ☐ 250 unidades de tranvía, de los que 108 unidades son tipo tranvitrén;
- ☐ 150 millones de pasajeros/año, de los cuales 55 millones son pasajeros de la red de tranvitrén. [20]

2.1.5. Explotación

Como se puede observar en el plano de la red, todas las líneas de metro ligero pasan por la Kaiserstrasse, que es la calle principal de la zona peatonal, en el corazón de Karlsruhe (véase la figura 3.3), y que constituye el destino del 60% de los viajeros transportados [26].



Figura 3.3: Tranvitrén circulando por el centro de Karlsruhe.

El metro ligero circula esencialmente en plataforma reservada (80% de la red). En los cruces que imponen un paso a nivel con la circulación rodada, los semáforos determinan automáticamente la prioridad del tranvía, lo que ha producido un aumento de la velocidad comercial de 18-19 km/h antes de las obras, hasta 24-25 e incluso 27 km/h en los tramos más favorables [15].

El 15 de Noviembre de 1993 se creó en Karlsruhe una Comunidad de Transportes (*Karlsruhe Verkehrsverbund – KVV*), tutelada por la Ciudad de Karlsruhe y los Landkreis de Karlsruhe y de Gernersheim. Los objetivos asignados a la KVV son:

- ☐ la puesta en marcha de una integración tarifaria entre los diferentes operadores que actúan en el territorio de la aglomeración.

- ❑ la planificación general del transporte, la evolución de la estructura de la red y la definición general de la oferta;
- ❑ la armonización de los horarios, la información uniformizada del público, etc.

La KVV cubre un área de 3 600 km² de territorio, englobando 120 ciudades y municipios, ocupados por 1,3 millones de habitantes. En total está formada por 21 sistemas de transporte público, y gestiona 200 líneas de autobús y ferrocarril [20].

El período de servicio es de 4:00 a 1:00 h los días laborables, hasta las 3:00 h los sábados, y de 5:00 a 2:00 h los domingos [41].

La AVG, en calidad de operador del sistema, recibe los ingresos derivados de la venta de billetes, y se hace cargo de todos los costes de operación del metro ligero. En contrapartida, paga una cantidad a la administración de la DB por la utilización de sus vías. Por otra parte, la DB sigue manteniendo los servicios de mercancías y de mensajería.

2.1.6. Resultados obtenidos

La explotación de la primera línea bimodal entre Karlsruhe y Bretten fue muy satisfactoria. Desde su apertura en Septiembre de 1992 se produjo un aumento de pasajeros del 479%, destacando el hecho de que el 40% de los mismos eran antiguos usuarios de vehículo privado. También aumentó el número de pasajeros los fines de semana. Antes de la apertura del Stadtbahn, el número total de usuarios era de 533 660 (488 400 por la semana, 39 000 los sábados y 6 200 los domingos), pero tras la misma se ha pasado a 2 554 976 (2 064 378 por la semana, 263 120 los sábados y 227 478 los domingos) [1].

El aumento de pasajeros se hizo notar también en el resto de las líneas que se han ido abriendo con el tiempo. Se presentan como ejemplo los siguientes datos:

- ❑ Línea Bruchsal – Menzingen: aumento del número de pasajeros/día de 1 800 a 4 100.
- ❑ Línea Bretten – Bruchsal: aumento de 900 a 3 800 pasajeros/día.
- ❑ Línea Karlsruhe – Pfinztal: aumento de 4 000 a 14 000 pasajeros/día.
- ❑ Línea Rastatt – Forbach: aumento de 2 700 a 7 000 pasajeros/día. [20]

Las encuestas sobre el motivo del viaje muestran que: el 38% de los pasajeros viaja para trabajar, el 23% lo hace para estudiar, el 15% viaja en su tiempo de ocio, el 12% viaja para ir de compras y el restante 12% viaja por otras razones [1].

Con respecto al acceso a las paradas o estaciones, se observa que el 72% de los viajeros llega a ellas a pie. Esto muestra que la decisión de mejorar el acceso de los peatones por medio de la introducción de paradas adicionales ha sido satisfactoria. En lo que respecta a los pasajeros restantes, el 10% llega a las paradas en otro medio de transporte público, el 4% en bicicleta y el 14% hace uso de las instalaciones de estacionamiento disuasorio. Muchos de los espacios de aparcamiento de las paradas están ya al límite de su capacidad, por lo que los usuarios aparcen en las calles cercanas, lo que ha llevado a hacer planes de extensión de los aparcamientos [14].

La proporción de transporte público en la ciudad de Karlsruhe es del 17%. En lo que se refiere al flujo de la región a la ciudad se alcanza una proporción de aproximadamente el 50%, e incluso en algunas rutas de mucho éxito se llega al 67%. Por término medio, la población que vive en el área de captación del metro ligero realiza entre 400 y 450 viajes al año utilizando el transporte público [41].

Aunque ya se ha comentado, es importante volver a recalcar que el éxito del tranvitrén de Karlsruhe está motivado, principalmente, por la reducción de los tiempos de viaje. Esta reducción de tiempo no es solamente debida a la ausencia de transbordos, sino que se deriva de las características específicas de un material ligero como el tranvía, con fuertes aceleraciones y cortas distancias de frenado. A este hecho se añade la aptitud para la entrada rápida de viajeros en las paradas, gracias al número y reparto de las puertas laterales de acceso.

2.1.7. Financiación

2.1.7.1. Marco normativo

Las infraestructuras de transporte importantes de las ciudades alemanas se financian según unas garantías acordadas que se reparten entre el Bund (Gobierno Federal), el Land federal y el municipio, cuyos fondos se obtienen principalmente a través de un impuesto específico (0,054 DM/litro, es decir 0,028 euros/litro) que forma parte del impuesto nacional sobre consumo de carburantes [2].

La ley que regula los tipos de financiación de las inversiones, la *Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz* (GVFG), ha sido modificada varias veces desde que se aprobó en 1971.

Los municipios pueden financiar con estos fondos tanto los sistemas de transporte público como la construcción de nuevas carreteras.

Los fondos son canalizados por el Länder, de manera que cada Land recibe una parte del total de acuerdo con una fórmula, mientras que el Gobierno Federal se queda con una parte para grandes proyectos.

En cada Land se clasifican los proyectos según criterios de coste-beneficio, que se calculan de acuerdo con diferentes normas según que se trate de proyectos de carreteras o de transporte público. Los fondos disponibles sólo se pueden utilizar si el municipio puede aportar la parte que le corresponde.

Los ratios de financiación han ido variando con el tiempo, pero en general, las proporciones se han mantenido en el entorno de 50:35:15 para el Bund, Land y municipio, respectivamente, lo que proporciona un incentivo muy fuerte para que las ciudades favorezcan este tipo de proyectos. El material rodante sólo se ha incluido dentro de las opciones para este tipo de inversiones a partir de los años 90. El déficit de explotación, de existir, debe financiarse con fondos locales [2].

2.1.7.2. Financiación del tranvitrén de Karlsruhe

Las obras necesarias para la puesta en servicio de la explotación del tranvitrén en la línea Karlsruhe Hbf. – Karlsruhe Marktplatz – Bretten – Eppingen – Hielbronn tuvieron un coste global de unos 80 millones de DM (del orden de 41 millones de euros). Además, se necesitaron 8 vehículos bitensión (1992) cuyo coste ascendió a 36 millones de DM, es decir, unos 18,5 millones de euros (el 15% del coste de cada vehículo se debía al equipamiento para doble tensión) [41].

En lo que se refiere a la línea Pforzheim – Karlsruhe – Wörth, los costes de inversión ascendieron a 40 millones de DM (20,5 millones de euros) para el tramo Grötzingen – Pforzheim (incluyendo la tercera vía para aumentar capacidad), y a 100 millones de DM (51 millones de euros) para el tramo Grötzingen – Wörth Rathaus (incluyendo la conexión, que fue muy cara). Asimismo, se necesitaron 24 vehículos bitensión (1997) cuyo coste ascendió a 108 millones de DM (55 millones de euros) [41].

De los costes de inversión de cada línea el 60% ha sido subvencionado por el Estado Federal y el 25% por el Land de Baden-Württemberg. El 15% restante representa la contribución de los municipios servidos (Karlsruhe, Walzbachtal y Bretten); la subdivisión administrativa territorial de Karlsruhe asume la mitad de la parte de los municipios de Walzbachtal y Bretten. Por otra parte, fueron los municipios afectados los que tuvieron que asumir la financiación de los vehículos, al no estar éstos subvencionados [36].

El déficit de explotación es pagado por el municipio de Karlsruhe en su territorio y por la administración territorial en el exterior. En este sentido, es de destacar que Karlsruhe tiene un porcentaje de costes cubiertos bastante elevado, ya que los ingresos por billetes cubren el 66% de los costes en el área de Karlsruhe y el 85% de los costes dentro de la región [1].

2.1.8. Vehículo

El tranvitrén de Karlsruhe, modelo GT8-100C/2S, que se presenta en la figura 3.4, es un automotor bitensión diseñado por Duewag en lo que se refiere a la parte mecánica y por ABB-Henschel en lo que se refiere a la parte eléctrica. Este vehículo es bidireccional debido a que las estaciones de la DB susceptibles de hacer de final de línea no disponen de un bucle de retorno.

Se trata de un automotor articulado de tres cajas sobre cuatro bogies, de 37 m de longitud y 2,65 m de ancho. La disposición de los ejes es de tipo B22B, situándose los bogies motores en las extremidades, mientras que los bogies portadores se sitúan clásicamente bajo las articulaciones. Los bogies motores están equipados con motores de tracción en corriente continua, de una potencia unitaria de 245 kW [26].

Todo el aparellaje ligado a la explotación en líneas compartidas se ha concentrado al nivel de la caja central, tanto sobre el techo como bajo el piso del vehículo. El conjunto de equipamientos necesarios para la circulación bajo 15 kV representa un peso de 5,5 t de las 58,6 t totales del vehículo automotor [26].

El freno eléctrico es de tipo combinado, de recuperación y reostático (este último modo sigue funcionando bajo la catenaria de 15 kV). Además dispone de un freno neumático, que actúa sobre los discos colocados no sólo en los bogies portadores (cuatro por eje), sino también en los bogies motores (dos por eje). Por último, existe un freno electromagnético de seguridad, con los patines aplicados sobre los hilos de carriles. La deceleración máxima en frenado de servicio se establece en $1,6 \text{ m/s}^2$ [26].

El automotor, con cuatro puertas deslizantes por costado, puede acoger a 100 viajeros sentados y 115 de pie (4 viajeros/m^2) [26].

Cada automotor bimodal, apto para circular en doble composición sobre la red de tranvías, y triple sobre la DB, cuesta 4,5 millones de marcos (2,3 millones de euros). A título de comparación, el precio de un automotor unidireccional monocorriente de la misma familia es de 3,8 millones de marcos (1,9 millones de euros).

En las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 se presenta un esquema del vehículo de tranvitrén de Karlsruhe, así como fotografías del mismo circulando por distintos ámbitos.

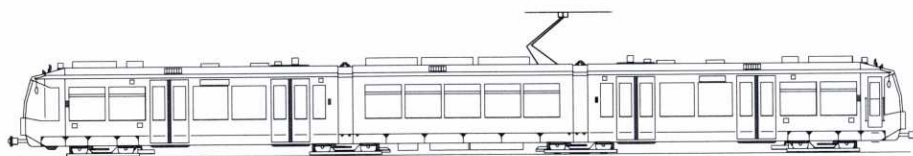


Figura 3.4: Esquema del tranvitrén de Karlsruhe.
Fuente: Modificado a partir de [15].



Figura 3.5: Tranvitrén de Karlsruhe en estación ferroviaria (Baden-Baden).



Figura 3.6: Tranvitrén de Karlsruhe circulando en zona urbana con vía en césped.

2.2. SAARBRÜCKEN

2.2.1. Introducción

La ciudad de Saarbrücken, con 196 000 habitantes y 101 000 puestos de trabajo, constituye la capital y centro económico del Land del Saar, cuya población supera el millón de habitantes [22].

A principios de los años 90, cada día 120 000 personas entraban en Saarbrücken, y el reparto entre el transporte público (ÖPNV, *Öffentlicher Personennahverkehr* - Transporte público urbano -), que se basaba simplemente en líneas de autobuses, y el tráfico individual motorizado, era de 25% contra 75% en la ciudad, y de 14% contra 86% en la periferia [31].

Al igual que en el caso de Karlsruhe, los viajeros que llegaban a la ciudad desde la región mediante el transporte público ferroviario tenían que realizar un intercambio modal, en este caso a los servicios de autobús, debido a la situación periférica de la estación principal.

La característica más destacada del tranvitrén de Saarbrücken está en el hecho de que, al contrario de lo que ocurría con Karlsruhe, en esta ciudad no contaban con una red de tranvías en funcionamiento, ya que la que existía antiguamente se había desmantelado en el año 1965.

2.2.2. Desarrollo del proyecto

2.2.2.1. Motivación

En 1991, tras realizar un estudio sobre la circulación en la ciudad, el Consejo Municipal de Saarbrücken decidió completar la red de autobuses mediante la introducción de un sistema de metro ligero bitensión, capaz de integrar la región urbana y metropolitana. El eje elegido para poner en servicio este sistema de transporte fue el de Lebach – Sarreguemines.

Las razones por las que se decidió que era necesaria una actuación de este tipo fueron las siguientes:

- ☐ Saarbrücken había sufrido un declive del 50% en el uso del transporte público después de cerrar las líneas de tranvías en 1965, llegando a su mínimo en 1982, con 25 millones de viajes [27].
- ☐ En plena fase de éxito del sistema de autobuses, el Consejo Municipal decidió la transformación de la Bahnhofstrasse en zona peatonal.

Esta calle era la arteria principal del sistema de transporte público, ya que en hora punta era atravesada por 100 autobuses.

Con el fin de no amenazar el éxito del transporte público se debería unir el centro urbano con el área metropolitana mediante un sistema de mayor capacidad (bajo la forma de metro ligero bitensión).

- La ciudad de Saarbrücken se había marcado el objetivo de mejorar la calidad del medio ambiente, reduciendo la tasa de tráfico de los vehículos particulares en un 20%. Para ello era necesario aumentar la capacidad del sistema de transporte público en un 65%, de tal manera que pudiese hacer frente al aumento del número de viajeros que supondría este hecho.

El sistema de autobús no parecía capaz de absorber esta demanda, ya que tendría que pasar de transportar 3 000 pasajeros/hora en cada dirección a un valor del orden de 5 000. Por ello, se eligió un sistema de tranvía moderno, que tiene la ventaja adicional de atraer a mayor número de usuarios del vehículo privado, debido a la calidad de los servicios y a la buena imagen del sistema [46].

- Una vez tomada la decisión de implantación de un sistema ferroviario de transporte urbano, el hecho determinante que hizo que se eligiese un sistema de metro ligero bitensión (capaz de circular por las vías ferroviarias convencionales al salir de la zona urbana), fue la existencia de una red de vías férreas muy importante en la región. En efecto, en un radio de 20 km en torno a Saarbrücken existen 180 km de vías, de los cuales 160 km están electrificados, y la mayoría en servicio o disponibles (véase la figura 3.7).

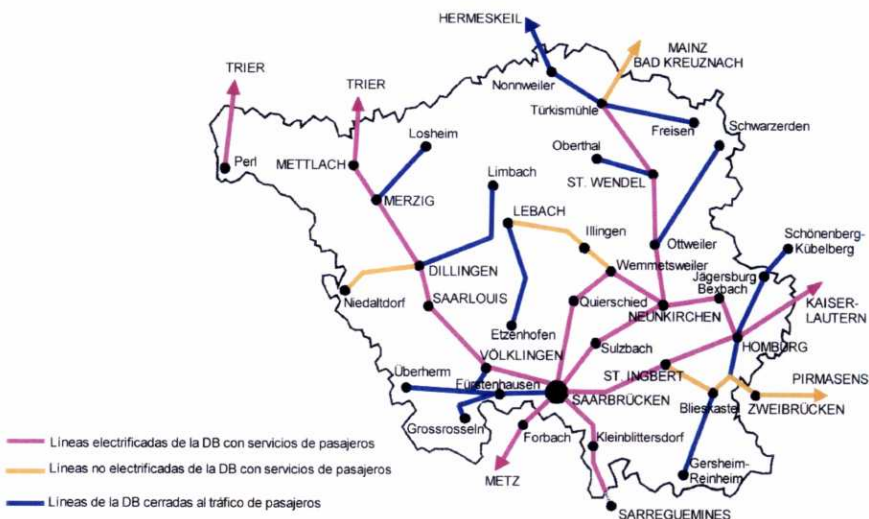


Figura 3.7: Red ferroviaria en la región de Saarbrücken.

Fuente: [41].

Para la implantación de un sistema de tranvitrén sería necesario, sin embargo, el establecimiento de vías en el centro de la ciudad, uniendo éste con la estación principal, ya que, como se ha comentado, la red de tranvías existente antiguamente había sido desmantelada en el año 1965.

- ❑ Con la aprobación de la Ley de Regionalización en enero de 1996 se abrió el acceso ferroviario a la red de la DB.

Por otra parte, con la Ley del Land del Saar concerniente al transporte público regional de viajeros, del 1 de febrero de 1996, se le asignaba al Gobierno Federal del Land la responsabilidad de la organización de este transporte sobre las vías de los ferrocarriles de la región [47].

2.2.2.2. Principales etapas de realización del proyecto

Los momentos más importantes para el desarrollo del sistema de tranvitrén de Saarbrücken fueron los siguientes [32, 46]:

- ❑ Diciembre de 1991: la Sociedad para el desarrollo de los tranvías en el valle del Saar (*Gesellschaft für strassenbahnen im Saartal AG, GSS*), sociedad que forma parte de VVS (*Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft Saarbrücken*, Compañía de Transporte y Logística de Saarbrücken), toma la decisión de introducir un sistema de transporte público de metro ligero.
- ❑ Febrero 1992: el Consejo Municipal de Saarbrücken paga los trabajos de planificación cuyo coste asciende a 12 millones DM (del orden de 6 millones de euros).
- ❑ Abril de 1992: comienzo de los trabajos de planificación.
- ❑ Junio de 1992: la GSS toma la decisión de crear la *Stadtbahn Saar GmbH*. Los accionistas serán GSS y el Land de Saarbrücken.
- ❑ Octubre de 1992: creación de la *Stadtbahn Saar GmbH*, cuyo capital pertenece en un 95% a la VSS. Esta sociedad será la encargada de la planificación y de la realización del proyecto del tranvitrén.
- ❑ Marzo de 1993: se mandan al Ministerio Federal de Transporte los documentos solicitando financiación de acuerdo con la ley de financiación del transporte público (GVFG). El ratio coste-beneficio previsto es 2:3, cumpliéndose con esto los requisitos de dicha ley.
- ❑ Julio 1993: el Consejo Municipal de Saarbrücken aprueba las líneas directivas de la política de transportes. Como base de estas directivas está el Saarbahn (nombre del tranvitrén de Saarbrücken).
- ❑ Noviembre 1993: el gobierno del Land del Saar da luz verde al proyecto.

- ☐ Diciembre 1993: comienzo de la petición de permisos para la ruta por el centro urbano desde Brebach hasta Pfarrer-Bungarten-Strasse (Iglesia de San Josef).
- ☐ Octubre 1994: se garantizan los permisos para la sección central Brebach – Iglesia de San Josef.
- ☐ Diciembre 1994: el Gobierno Federal firma un acuerdo inicial para subvencionar el 60% del proyecto, cuyo coste estimado (incluyendo la compra del material rodante) es de 540 millones de DM, es decir, 276 millones de euros (de Lebach a Sarreguemines).
- ☐ Enero 1995: el Gobierno del Land del Saar adopta las medidas de subvención (30% del coste del proyecto). Se firma el contrato de construcción por Bombardier Transport de 15 vehículos y de la opción de 13 vehículos suplementarios.
- ☐ Marzo 1995: comienzo de los trabajos de construcción en varios puntos de la zona urbana.
- ☐ Verano 1995: representantes de las autoridades de Lorraine y políticos de las ciudades próximas a la frontera declaran su intención de ponerse de acuerdo con los responsables del Saarbahn con el propósito de extender su red a través de la frontera hasta Freyming-Merlebach.
- ☐ Marzo 1996: El Gobierno del Land da instrucciones al Saarbahn para presentar una oferta al objeto de eliminar el tráfico ferroviario convencional en la ruta hacia Völklingen y alternativamente hacia Merzig.
- ☐ Mayo 1996: creación de la Saarbahn, Sociedad que explota el metro ligero. Responsable de la tarificación, de los horarios, del personal y del marketing.
- ☐ Mediados 1996: comienzo de los procedimientos para obtener los permisos para las secciones de la línea de Saarbrücken Malstatt/Lebacher Strasse hasta el límite urbano de Saarbrücken y Reigelsberg a Köllertarbahn.
- ☐ 24 de octubre de 1997: inauguración oficial de la explotación del primer tramo de línea Ludwigstrasse-Sarreguemines.
- ☐ Julio 1999: construcción de Josefbrücke, puente sobre ocho vías ferroviarias, y extensión hasta Cottbuser Platz.
- ☐ Octubre 2000: extensión hasta Siedlerheim.
- ☐ Momento actual: en servicio desde Sarreguemines hasta Riegelsberg Süd.

- ❑ Queda pendiente el tramo desde Riegelsberg Süd hasta Lebach, que se dividirá en dos partes, la primera desde Riegelsberg Süd hasta Etzenhofen, y la segunda desde Etzenhofen hasta Lebach. Ambas partes comenzarán a construirse en la primavera de 2003, y está prevista su terminación a finales de 2004 o principios de 2005. Con esto se completaría la primera etapa de desarrollo del Saarbahn. El aspecto de la línea se muestra en la figura 3.8.

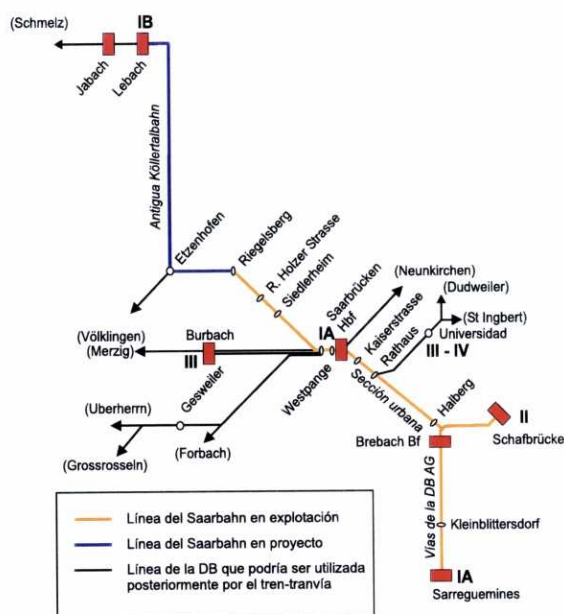


Figura 3.8: Línea de Saarbrücken.

Fuente: Modificado a partir de [32].

- ❑ A finales del año 2002 se decidió impulsar una nueva etapa de desarrollo, de manera que el eje norte-sur se complemente con un eje oeste-este, que pasando por Burbach llegue hasta Völklingen. A este tramo se le concedería la misma prioridad que al tramo final de la etapa 1, de tal manera que el tramo de nueva construcción necesario para esta conexión debería estar finalizado también en 2004/2005.
- ❑ Finalmente, se extendería este eje oeste-este hasta St. Ingbert, de tal manera que la red quedaría como se muestra en la figura 3.9. Esta última fase todavía no tiene un plazo comprometido para su finalización.

2.2.3. Descripción de la línea

La primera línea del Saarbahn, en parte ya en funcionamiento, se compone de los siguientes tramos:

- ❑ La sección Brebach Bahnhof – Sarreguimines, que toma las vías de la DB a partir de Saarbrücken-Ost (13 km), y después las de la SNCF a partir de la frontera (1 km).

Se trata de una doble vía electrificada en 15 kV 16 2/3 Hz utilizable tal y como está, salvo por la necesidad de reacondicionamiento de los andenes, así como del establecimiento de cinco paradas suplementarias para ofrecer mejor servicio a las zonas atravesadas. Se debe destacar que la

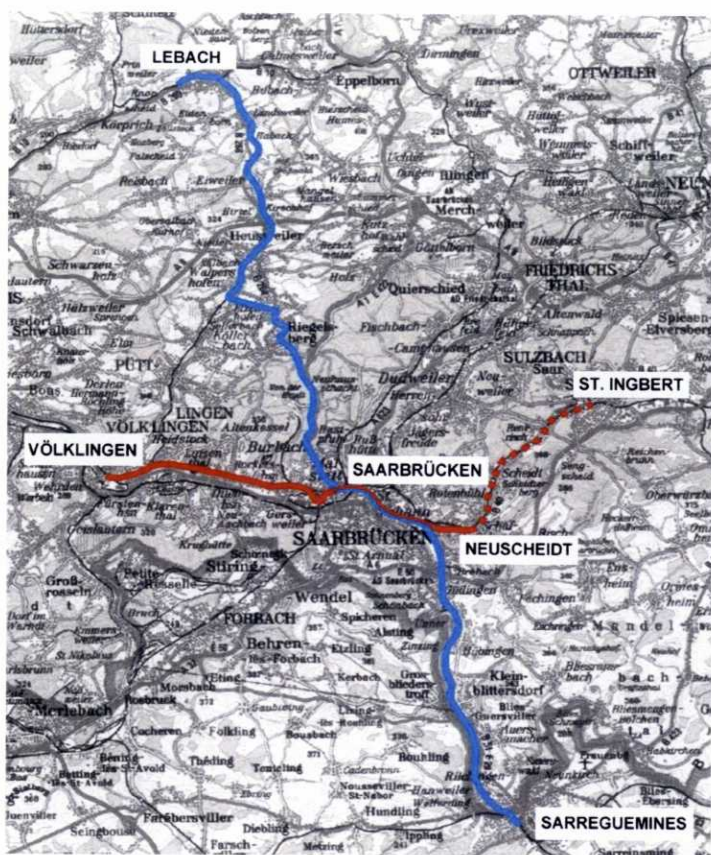


Figura 3.9: Red planificada para Saarbrücken.

Fuente: [32].

alimentación de la tensión de tracción en el tramo de la SNCF corresponde a la DB [34].

Desde la puesta en servicio de este primer tramo, la DB ha suprimido el tráfico de viajeros sobre esta línea, conforme a un acuerdo firmado previamente. Sin embargo, la SNCF sigue utilizándola para tráfico de viajeros dos veces al día, con vehículos diesel, para realizar el servicio entre Saarbrücken y Strasbourg. Asimismo, se mantienen los servicios de mercancías locales.

- El tramo urbano (5 km), de la Westspange a Brebach Bahnhof. Esta línea sirve a la estación central de Saarbrücken (Saarbrücken Hbf), pero se ha evitado la calle peatonal principal (Bahnhofstrasse) en beneficio de la Kaiserstrasse, con lo que se pretende una revitalización de esta zona.

La técnica constructiva utilizada ha consistido en la apertura de un lado de la calle, para la realización del desvío de los servicios, construyendo des-

pués la nueva estructura y superficie de la calle. Una vez que el tráfico ha sido desviado a la zona reconstruida, se excava el otro lado para construir la placa de hormigón sobre la que se apoyan los carriles (en la figura 3.10 se puede ver la sección de la calle antes y después de la introducción del Saarbahn).

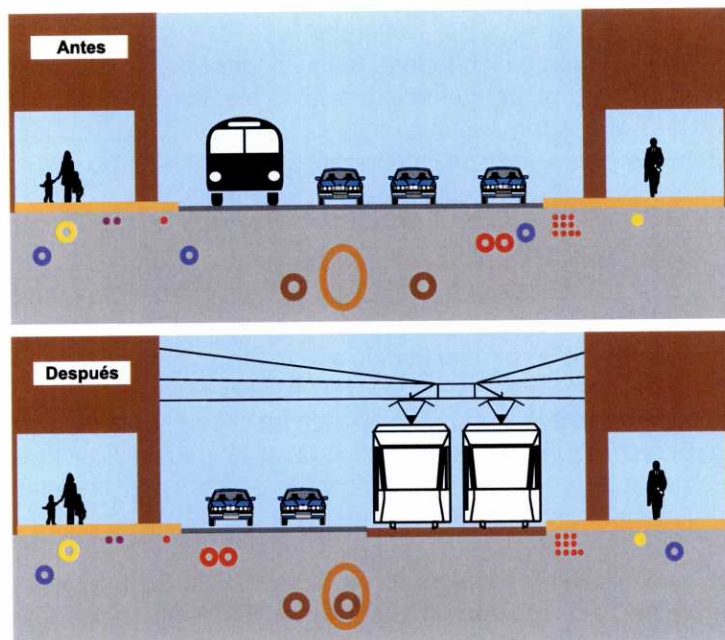


Figura 3.10: Sección de calle en Saarbrücken antes y después de la implantación del Saarbahn.

En su término, la línea I A se complementa con una conexión de Halberg a Schafbrücke.

Estos 5 km, junto con los 13+1 anteriores, ya estaban construidos e integrados en la línea puesta en servicio en octubre de 1997 [34].

- Conexión desde la sección anterior hasta Riegelsberg, también de nueva construcción, cuya longitud es del orden de 10 km.

En Riegelsberg el metro ligero circula por 2,1 km de vía simple a lo largo de una calle estrecha, pasando muy cerca de las casas y las tiendas. Dos lazos aseguran la posibilidad de circular con intervalos de 10 minutos.

Una vez pasado Riegelsberg, el Stadtbahn recobrará la vía doble hasta que llega al siguiente tramo, la antigua Köllertalbahn, que se tomará cerca de Etzenhofen.

- La reapertura del tramo de la antigua línea de Köllertalbahn, situado entre Riegelsberg-Walpertshofen y Lebach.

La línea es de vía única en la mayor parte de su recorrido. Su trazado ya existe pero será necesario renovar completamente la superestructura y electrificar la sección.

La DB había suprimido todo el tráfico sobre esta línea a principios de los años 90. Sin embargo, el reacondicionamiento de la línea se realizará según las normas ferroviarias, ya que a largo plazo se pretende reinsertar el tráfico de mercancías en este tramo. El gálibo será acondicionado en este sentido, al igual que los andenes.

En lo que concierne al trazado, se ha establecido como radio mínimo genérico 50 m, aunque en ciertos lugares del centro urbano ha sido necesario llegar a radios de 30 m. En lo que se refiere a las pendientes, se alcanzan valores de 80 mm/m, debido a la topografía de la zona [31].

En zona urbana, las vías se disponen en el centro o a un lado de la calzada. El recorrido es en plataforma reservada y doble vía a lo largo de prácticamente toda su longitud, necesaria para satisfacer las altas frecuencias previstas para hora punta.

En zona urbana la entrevía es de 3,05 m (o de 3,50 m si va con mástiles centrales), y los cruces a nivel con las calles están equipados con semáforos sincronizados. En las zonas de la DB, la entrevía es de 4 m [41].

Las zonas con vía única en zona urbana se producen fuera del centro, principalmente en la travesía de Riegelsberg. Asimismo, en la zona de la antigua Köllertalbahn, tampoco es posible disponer de vía doble. Sin embargo, las frecuencias previstas en estas zonas no plantean ningún problema para su consecución con vía única.

2.2.4. Explotación

Cuando esté completa la línea 1, la longitud total será de 44 km, y el servicio se realizará mediante 28 vehículos construidos por Bombardier Transport.

La distancia media entre paradas la zona urbana está en el de los 500 m. En cada parada y estación del Saarbahn existe un sistema dinámico de información al pasajero, operado desde la oficina de control. En muchas de ellas existe la posibilidad de intercambio con otros modos/líneas de transporte público. Por otra parte, varias estaciones están dotadas con estacionamientos disuasorios. Un ejemplo es la estación de Bübingen, dotada con 110 plazas [46].

Los servicios cubren el período 4:30 – 0:30 h. Las frecuencias de circulación son las siguientes:

- ☐ Entre la Ludwigstrasse y Brebach (recorrido urbano): 7,5 minutos en las horas punta y normales, y 15 minutos en las horas valle.
- ☐ Entre Brebach y Kleinblittersdorf, se pasa a 15 y 30 minutos respectivamente.
- ☐ De Kleinblittersdorf hasta Sarreguemines, 30 y 60 minutos. [46]

Esta oferta es netamente superior a la que ofrecía la DB antes de la puesta en servicio del metro ligero regional, que era de dos trenes regionales expresos por día y dirección en los días laborables.

La velocidad comercial en el total del recorrido está en torno a 35 km/h, de tal manera que el tiempo total de Lebach a Sarreguemines será de 73 minutos [47].

El sistema tarifario está completamente integrado con los sistemas de transporte público urbano en autobús (SaBus). Por otra parte, los horarios del Saarbahn se han adaptado para ofrecer buenas conexiones con los trenes de la SNCF de la estación de Sarreguemines.

2.2.5. Resultados

La implantación del sistema Saarbahn ha producido un aumento de la demanda en la línea. Así, de lunes a viernes 25 000 viajeros toman el Saarbahn, incluyendo los dos sentidos. Con respecto a los fines de semana se han contabilizado 14 000 viajeros los sábados y 6 000 los domingos. Estas cifras suponen un aumento del 400% respecto a las obtenidas en 1996, cuando la DB realizaba el servicio de viajeros desde la estación de Saarbrücken hasta Sarreguemines [46].

Las horas punta se dan de 7 a 8 h de la mañana, de 13 a 14 h al mediodía y, en menor grado, de 16 a 17 h [46].

2.2.6. Futuras extensiones previstas

Como se ha comentado anteriormente, la primera extensión pendiente consiste en la terminación de la primera etapa del proceso, rematando la primera línea, de forma que se llegue de Sarreguemines a Lebach. Esta ampliación tiene como horizonte de apertura el final del año 2004, o principios del 2005.

Con el mismo horizonte temporal se plantea el comienzo de la segunda línea del Saarbahn, que llegaría desde Saarbrücken a Völklingen pasando por Burbach.

A mayor plazo, y sin existir una planificación detallada, se plantean las siguientes actuaciones:

- ❑ Prolongación de la red urbana 700 m hacia el oeste, y conexión con línea de la DB en dirección Gersweiler y Forbach. Esta prolongación hacia Forbach tiene el problema de la actual electrificación en 25 000 V 50 Hz. Sin embargo, existen soluciones técnicas, como la puesta en servicio de automotores tritensión, o la disposición de una tercera vía con alimentación en 750 V.
- ❑ Línea hacia la Universidad y posteriormente hacia Dudweiler y St. Ingbert. [32]

En total, una vez realizadas todas las extensiones previstas, el Saarbahn dispondrá de una red de 160 km de vías [41].

2.2.7. Financiación

La financiación de la infraestructura de la línea Lebach – Saarbrücken – Sarreguemines se repartió de la siguiente forma: 60% el Gobierno Federal, 30% el Land del Saar y 10% la Saarbahn GmbH. Por su parte, los vehículos se compraron con capital del Land del Saar (75%) y de la Saarbahn GmbH (25%) [41].

El coste total del proyecto Saarbrücken (Ludwigstrasse) – Sarreguemines fue de 418,4 millones de DM (213,9 millones de euros): 11,3 millones de DM (5,7 millones de euros) para la compra de terrenos; 103,6 millones de DM (53,0 millones de euros) para la realización de las obras; 223,2 millones de DM (114,1 millones de euros) para las instalaciones de funcionamiento; y 80,3 millones de DM (41 millones de euros) para otras medidas. A esta cantidad hay que añadir el coste del material móvil, que ascendió a 121,6 millones de DM (62,2 millones de euros) [41].

2.2.8. Vehículo

El vehículo del Saarbahn, diseñado por Bombardier Transport, es un tren articulado triple de 37 m de longitud por 2,65 m de ancho, que se puede ver en la figura 3.11 [34].

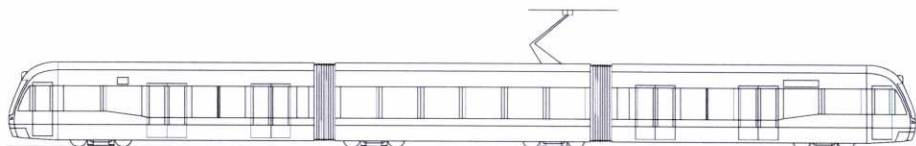


Figura 3.11: Esquema del vehículo de Saarbrücken.

La caja central, de 10 m de longitud, reposa sobre dos bogies motores, no tiene puertas de acceso, y ofrece 48 plazas sentadas según una disposición “2+2”, así como aire acondicionado. Esta sección está dedicada a los pasajeros que tienen

que realizar un largo recorrido. Las dos cajas de los extremos reposan sobre un bogie motor en una extremidad, y se apoyan en su articulación con la caja intermedia en la otra [34].

Los ocho ejes son, por tanto, motores, lo que confiere al vehículo una adherencia total que permite una mejor aceleración en el arranque, un frenado rápido y, por tanto, una mayor capacidad de alcanzar una velocidad elevada.

Los ocho ejes del vehículo están accionados individualmente por motores de corriente trifásica. La potencia de tracción instalada es de 960 kW (8x120 kW), netamente superior a la de los vehículos ferroviarios equivalentes. Esta potencia elevada permite a este tranvitrén franquear pendientes de hasta el 80‰ [34].

Los vehículos son de tipo bidireccional, disponiéndose un puesto de conducción en cada extremo. La cabina está climatizada y equipada con sistemas electrónicos de conducción y de seguridad adaptados a los dos modos: tranvía y tren.

Está equipado con ocho puertas laterales, de 1,3 m de ancho, cuyo cierre se controla mediante células fotoeléctricas.

Cada vehículo puede transportar a 243 pasajeros, de los cuales 96 pueden ir sentados. Los espacios reservados para sillas de ruedas, cochecitos de bebés y bicicletas se disponen en las cajas de los extremos [34].

En su parte más baja, el suelo está a una cota de 400 mm por encima de la tabla de rodadura. Por encima de los bogies y al nivel de las articulaciones, la altura pasa a 595 mm, y a 800 mm sobre la caja central. Para acceder desde las plataformas de entrada a los extremos de las cajas, es necesario franquear un escalón de 195 mm. El paso de las plataformas a la caja central se realiza por dos escalones distintos: un primer escalón de 195 mm situado ante la articulación y un segundo de 205 mm más allá de la articulación. El ancho de los escalones es de 580 mm, para un ancho de paso entre sillas de 630 mm. En total, el piso bajo representa un 48% de la longitud del vehículo [34].

En la figura 3.11 se presentaba un esquema del vehículo de Saarbrücken. En las figuras 3.12 y 3.13 se presenta el Saarbahn circulando por zona urbana y por zona ferroviaria respectivamente.

2.3. KASSEL

2.3.1. Introducción

La ciudad de Kassel está situada en la región de Hesse, en el centro de Alemania. Es un centro industrial, ferroviario y cultural cuya población asciende a 250 000 habitantes. Las industrias más importantes son la textil, la óptica y la de instrumentos de precisión, locomotoras y vehículos a motor [7].



Figura 3.12: Saarbahn circulando por zona urbana.



Figura 3.13: Saarbahn circulando por zona ferroviaria.

Fuente: [24].

2.3.2. La red tranviaria

La base del sistema de transporte local de la KVG (*Kasseler Verkehrsgesellschaft AG*, Compañía de Transportes de Kassel) es la red tranviaria, compuesta por nueve líneas, realizando un transporte tranviario eficiente de gran cobertura, debido principalmente a que las líneas fuera del centro urbano discurren mayoritariamente en plataforma reservada (70% de las vías separadas del resto del tráfico).

El ancho de vía es de 1 435 mm. Los carriles utilizados son el UIC-60 y el S49. Se utilizan traviesas de tipo monobloque con un espesor de balasto de 30 cm. Las sujeciones son de tipo Vossloh. El mínimo radio de curva es de 30 m y el máximo peralte de la vía de 120 mm [30].

El suministro de energía eléctrica se realiza por medio de catenaria con una altura mínima de la línea de contacto de 4,20 m. El tipo de catenaria utilizada es de suspensión simple y suspensión simple regularizada. La tensión de alimentación es de 600 V CC [30].

Las estaciones tienen 40 m de longitud y se alcanzan por medio de rampas con una pendiente no mayor del 6%. El espacio entre el borde del andén y el vehículo es de 80 mm.

2.3.3. La red Regiotram

En el año 1999 las líneas tranviarias 4 y 8 se extendieron a Kaufungen Papierfabrik. El número de pasajeros en esta corta sección aumentó en un 16% desde su apertura. En la actualidad ya se han terminado las obras en la Lossetalbahn desde Kaufungen Papierfabrik a Helsa. La línea, de 14 km, utiliza la antigua línea ferroviaria de la Waldkappeler Van, que se utiliza únicamente para tráfico de mercancías. El presupuesto de las obras ascendió a 32,1 millones de DM (16,4 millones de euros), y se terminó a finales del año 2001. Está prevista una nueva extensión, para el horizonte del año 2005 o 2006, que llevará la línea tranviaria hasta Hessisch Lichtenau.

Estas extensiones forman parte de un plan bimodal más extenso, llamado Regiotram, que incluye un intercambiador en Kassel Hauptbahnhof (estación ferroviaria principal) y una nueva línea tranviaria en el centro urbano. Esta red proporcionará una conexión directa desde el centro urbano hasta las ciudades y pueblos de los alrededores de Kassel. En la figura 3.14 se puede observar el trazado dicha red.

La línea B de dicha ambiciosa red, que va desde la estación principal de Kassel (Kassel Hauptbahnhof) con Hofgeismar y Warburg (30 km al noroeste de Kassel), ya está también en funcionamiento desde Junio de 2001.

La red del Regiotram planeada hasta el momento consistiría en las siguientes líneas:

- ❑ Línea A: Kassel – Kaufungen – Hessisch Lichtenau (nueva construcción: Kaufungen – Hessisch Lichtenau). La puesta en servicio del tramo Kaufungen – Helsa de esta línea tuvo lugar a mediados del año 2001, con un tiempo de viaje de 15 minutos. El segundo tramo tiene prevista su puesta en servicio para el año 2004, con un tiempo de viaje de 30 minutos.

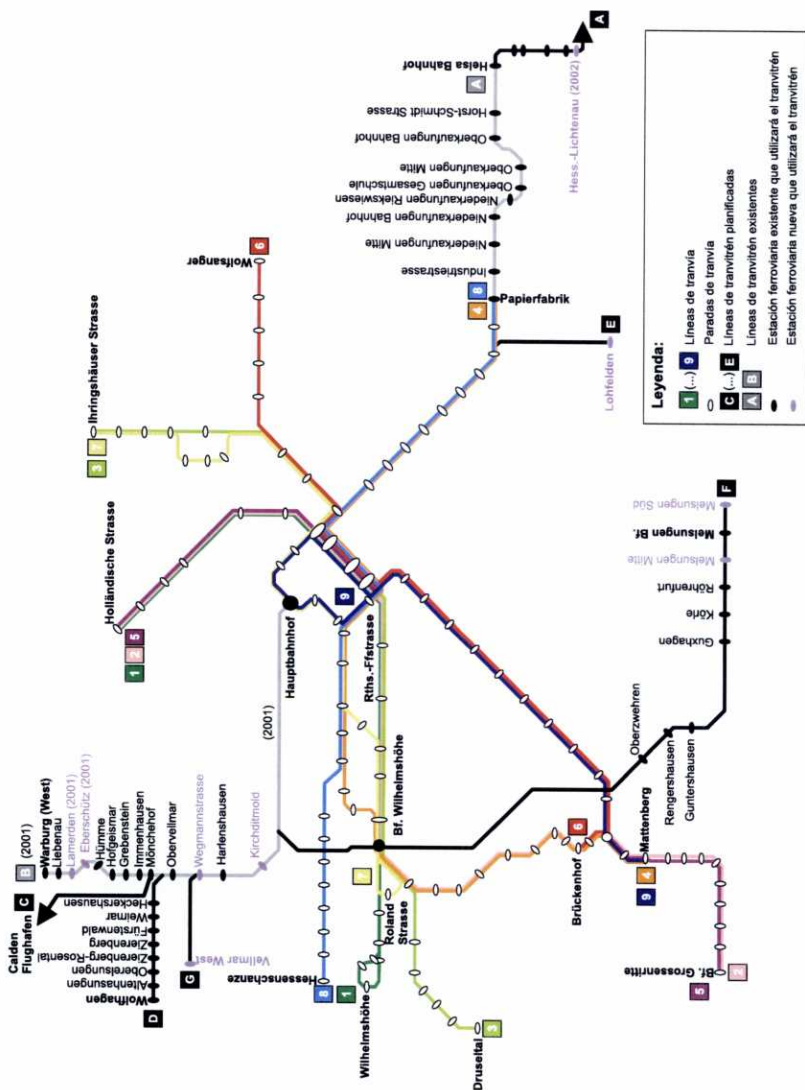


Figura 3.14: Red de tranvías y Regiotram de Kassel.
Fuente: Modificado a partir de[B].

- ☐ Línea B: Kassel – KS-Harleshausen – Obervellmar – Mönchehof – Immenhausen – Grebebsstein – Hofgeismar – Hümme – Liebenau – Warburg. Esta línea se puso en servicio, desde Kassel a Hofgeismar, con un tiempo de viaje de 30 minutos. El tramo de Hofgeismar a Warburg se pondrá en servicio en el año 2005, y el tiempo de viaje será de 60 minutos.
- ☐ Línea C: Kassel – KS-Harleshausen – Obervellmar – Mönchehof – Calden – Kassel – Calden – Flughafen (nueva construcción: Mönchehof – Flughafen).
- ☐ Línea D: Kassel – Wolfhagen (prevista la puesta en servicio para 2005-2006).
- ☐ Línea E: Kassel – Kaufungen – Lochfelden (nueva construcción: Kassel – Lohfelden).
- ☐ Línea F: Kassel – Melsungen (prevista la puesta en servicio para 2005-2006).
- ☐ Línea G: Kassel – Vellmar Oeste (nueva construcción: Kassel – Vellmar Oeste).

A mayores, está prevista la construcción de una nueva línea tranviaria por el centro de Kassel.

2.3.4. Material móvil

En diciembre de 2001 Kassel firmó un acuerdo de compra de 28 “Regio CITA-DIS” de Alstom, 18 de ellos bitensión, y 10 diesel-eléctricos. La primera entrega está prevista para el año 2004.

La configuración de estos vehículos se muestra en la figura 3.15. Tienen una longitud aproximada de 36 m, un ancho de 2 400 mm, y una altura aproximada de 3,70 m. Están dotados de piso bajo en el 75% del vehículo, siendo la altura de entrada al vehículo de 350 mm, mientras que la altura en las zonas de piso bajo es de 420 mm y en el resto de 650 mm [9].

Este vehículo es capaz de circular sobre curvas de hasta 22 m de radio; dispone de espacios para sillas de ruedas, bicicletas y equipajes; además, está dotado con aire acondicionado.

La velocidad máxima de circulación es de 100 km/h, y la aceleración de 0 a 50 km/h es de 0,80 m/s² en los vehículos eléctricos y de 0,61 en los diesel [9].

En la figura 3.16 se puede observar el Regiotram de Kassel, en pruebas. El vehículo que se ha utilizado en estas pruebas es propiedad de la red de tranvitrén de Saarbrücken.

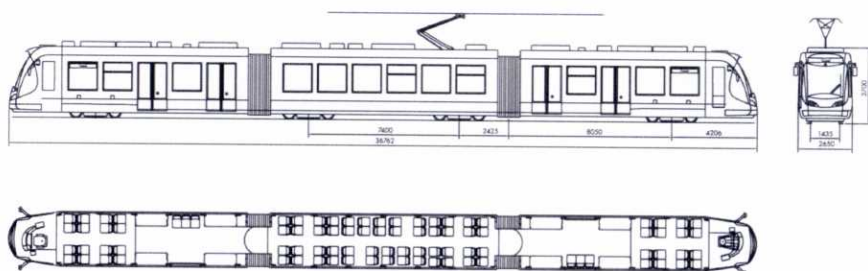


Figura 3.15: Esquema del tranvitrén de Kassel.

Fuente: [9].



Figura 3.16: Pruebas en Kassel con el vehículo de Saarbrücken.
Zona ferroviaria. Fuente: [F].

2.4. BRAUNSCHWEIG

2.4.1. Introducción

La ciudad de Braunschweig es el centro cultural y económico de la Baja Sajonia, y tiene una población de 260 000 habitantes.

La división regional de la DB ("DB Regio") se encarga de proporcionar el transporte regional de pasajeros de la ciudad de Braunschweig. La red se completa con redes de autobuses municipales y regionales, además del sistema tranviario que tiene la ciudad de Braunschweig en sí.

Dentro de la red ferroviaria (mostrada en la figura 3.17) los corredores con más demanda son Hannover – Wolfsburg y Hannover – Braunschweig – Helmstedt –

Magdeburg, mientras que la demanda de los corredores norte-sur es mucho menor [49].

2.4.2. El RSB

La empresa ZGB (*Zweckverband Grosraum Braunschweig*, Asociación para el desarrollo de Braunschweig y su región) es la responsable, desde 1996, de estudiar los servicios tranviarios, de metro ligero, de autobuses y de ferrocarril metropolitano en la zona. Una de las primeras tareas que acometió tras su creación fue la realización de un plan director de transporte público.

Para ello, se llevó a cabo una encuesta para determinar los flujos de pasajeros y para obtener los servicios de transporte metropolitano más apropiados en su conjunto. Las opciones que se barajaron fueron: ajustes en la red tranviaria y paso a red de autobuses; optimización de la red de la DB; o integración de la red de la DB de la región con la red tranviaria de Braunschweig. La conclusión obtenida fue que la solución más coherente sería una combinación del ferrocarril regional/municipal (llamado *RegioStadtBahn*, RSB, que se podría traducir como metro ligero regional).



Figura 3.17: Red ferroviaria de Braunschweig. Fuente: [33].

Así, la ZGB realizó unas actividades de planificación para determinar qué infraestructura sería necesaria para la implementación del RSB, y cuáles serían las necesidades de inversión que requeriría. Las líneas que se perfilaron como necesarias fueron las siguientes (véase la figura 3.18):

- ☐ Goslar/Bad Harzburg – Braunschweig
- ☐ Salzgitter-Lebenstedt – Braunschweig
- ☐ Helmstedt – Wolfenbüttel – Braunschweig
- ☐ Uelzen – Wieren – Gifhorn – Braunschweig
- ☐ Wipshausen – Braunschweig

También se realizaron consideraciones acerca de la posibilidad de construir nuevas extensiones ferroviarias en los territorios de las ciudades de Gifhorn y Salzgitter-Lebenstedt, que se harían en la forma de líneas tranviarias.

Dentro de Braunschweig las líneas ferroviarias se conectarían con la red tranviaria en tres puntos, mientras que se haría una única conexión en Gifhorn y otra en Salzgitter-Lebenstedt.

El problema más peculiar de la ciudad de Braunschweig radica en el hecho de que, mientras que las líneas ferroviarias de la región tienen todas un ancho de 1 435 mm, las líneas tranviarias del centro urbano tienen un ancho de 1 100 mm. Por ello, cuando se empezó a desarrollar la idea del RSB, se hizo la petición a la empresa de transporte público de Braunschweig (*Braunschweiger Verkehrs, AG*) de que adaptase toda su nueva infraestructura de tal manera que no hubiese ningún problema en caso de querer convertirla a ancho 1 435 mm. De esta forma, en algunas zonas de nueva construcción se han dispuesto vías con tres carriles para que queden preparadas para el RSB.

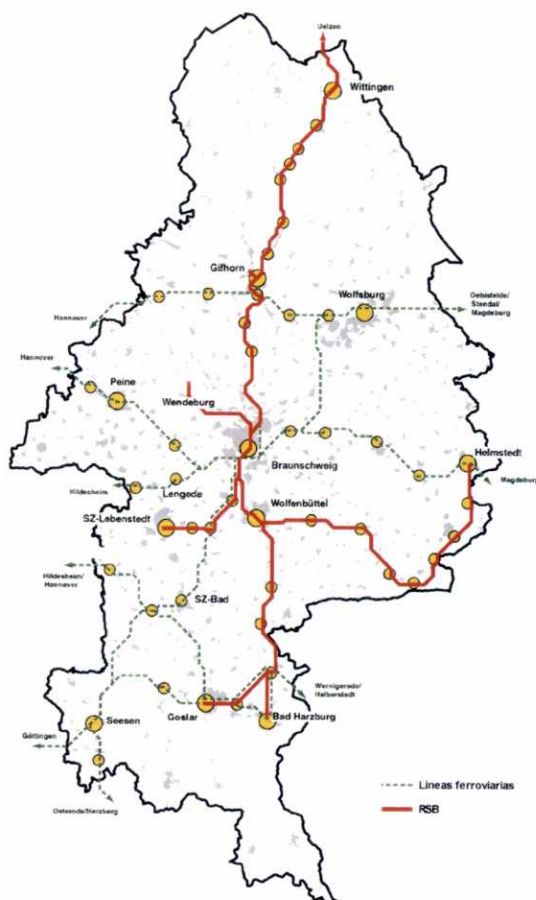


Figura 3.18: Red tranvía regional Braunschweig.
Fuente: [33]

El objetivo es que, empezando por las líneas en las que sean necesarias vías de tres carriles para la utilización por el RSB, en un plazo de 20 años toda la red operada por *Braunschweiger Verkehrs, AG* haya sido convertida a ancho 1 435 mm.

Las actuaciones para la implantación del sistema RSB se pueden resumir como:

- ☐ actuación sobre 230 km de líneas ferroviarias convencionales;
- ☐ actuación sobre 13 km de vías tranviarias, de los cuales 6,4 km serían de nueva construcción y 5,6 km ya existentes;

- ☐ actuación en 85 estaciones y paradas;
- ☐ necesidad de 30 vehículos para la explotación. [33]

El coste de la actuación ascendería a 228 millones de euros, con lo que se obtiene un ratio beneficio/coste de 1,32, que implica la aceptación en el plan de financiación de la GVFG. Así, una parte de la actuación será financiada por el Estado, y el resto será asumido por la ciudad y los municipios afectados [1].

La fecha prevista de puesta en funcionamiento de la primera línea de RSB es en el año 2006. La red completa podría estar en servicio en el año 2010.

2.4.3. Explotación

En lo que se refiere a la captación de pasajeros, se establecerá un nuevo sistema de información al viajero, que realizará las funciones de información y monitorización, lo que incluye:

- ☐ seguimiento de los movimientos de los vehículos;
- ☐ comparaciones de horario objetivo/real;
- ☐ información a los pasajeros.

Para ello, se instalarán dispositivos de información al pasajero en cada parada. En general, estos dispositivos muestran la hora de salida, el número de ruta y el destino del próximo vehículo. También se pueden utilizar para dar información especial, como el retraso de un determinado vehículo.

La frecuencia de operación será, como mínimo, de 1 vehículo cada 30 minutos en el período de las 5:00 h a las 23:00 h. Por otra parte, y también para mejorar el servicio y aumentar la captación de pasajeros, se tratará de establecer las mejores interconexiones posibles entre el RSB y las redes de autobús.

La predicción realizada estima que con estas medidas se obtendrían 7,2 millones de pasajeros adicionales por año.

2.5. HEILBRONN

2.5.1. Introducción

La ciudad de Heilbronn está incluida en la región alemana Heilbronn-Franken, cuyas principales poblaciones son las siguientes [3]:

- ☐ Distrito rural de Heilbronn: 317 578;

- ☐ Schwäbisch-Hall: 184 819;
- ☐ Main-Tauber-Kreis: 137 135;
- ☐ Hohenlohekreis: 106 930;
- ☐ Ciudad de Heilbronn: 119 800.

La ciudad de Heilbronn tiene aproximadamente 74 000 puestos de trabajo, 20 000 plazas escolares y aproximadamente 3 300 plazas universitarias.

2.5.2. La red

Las primeras consideraciones sobre la implantación de un sistema ferroviario metropolitano en el área de Heilbronn se produjeron a principios de los años 90, cuando la red de tranvitrén de Karlsruhe llegó a la vecina ciudad de Bretten. Dichas consideraciones surgieron a partir del propósito de captar con el transporte público el 50% del crecimiento pronosticado de la movilidad motorizada, objetivo que sólo se podría conseguir con una red de gran calidad.

La red que se pretende desarrollar para el horizonte del año 2010, constituida por 54 km de vías en el eje este-oeste y 86 km de vías en el eje norte-sur, se presenta en la figura 3.19. Dicha red constituye un total de 140 km de vías de los que sólo son de nueva creación 10,5 km de vías tranviarias y 17,5 km de vías ferroviarias convencionales, además de algunas actuaciones puntuales en las líneas ya existentes [3].

2.5.3. Explotación

En la zona central de la red la frecuencia es de 20 minutos, bajando a frecuencias de 30 minutos e incluso de una hora en los tramos menos cargados y más alejados del centro. El período de operación es de 5:00 h a 1:00 h.

2.5.4. Costes y financiación

Los costes de implantación de los tramos existentes y del que se abrirá en el año 2004 son los siguientes [3]:

- ☐ El tramo Eppingen – Heilbronn tuvo un coste total de 71,8 millones de euros, que, con una longitud de 24 km, se traduce en un coste de 3 millones de euros por kilómetro.
- ☐ El tramo del centro urbano de Heilbronn, constituido por 3,1 km de nueva creación, tuvo un coste de 58,7 millones de euros, lo que se traduce en un coste de 18,9 millones de euros por kilómetro.

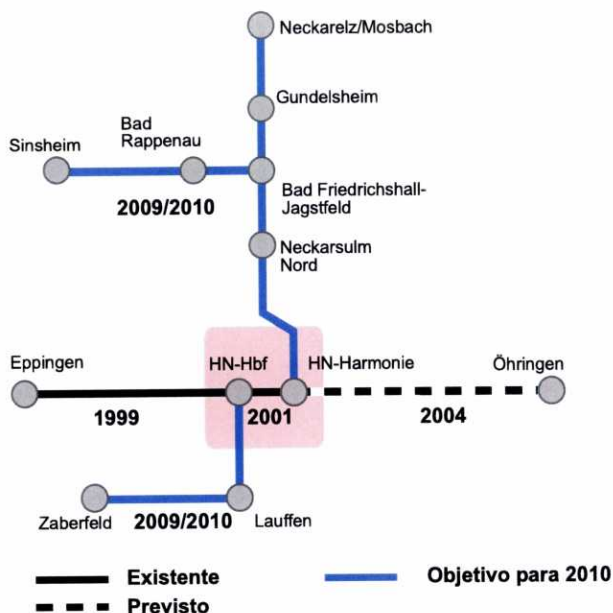


Figura 3.19: Red de tranvitrén de Heilbronn.

Fuente: [3].

- El tramo Trappense – Öhringen tendrá un coste total de 98,0 millones de euros, y dado que su longitud es de 26,8 km, el coste por kilómetro será de 3,7 millones de euros.

El coste de las infraestructuras se financia por medio de la GVFG, que cubre 126,9 millones de euros, del total de 171, de tal manera que las autoridades locales deben pagar 44,1 millones de euros, lo que supone un 25,7% de los costes totales. De estos 44,1 millones, 23,7 son asumidos por la ciudad de Heilbronn.

En lo que se refiere a los vehículos, se financian en un 50% a través del Land Wuerttemberg, y el resto a través de las administraciones locales afectadas.

3. SISTEMAS DE TRANVITRÉN EN FRANCIA

En el caso francés, los sistemas de tranvitrén se han desarrollado de forma bastante lenta a partir de la apertura del caso alemán de Saarbrücken, que circulaba en un tramo de 1 km sobre líneas de la SNCF (*Société Nationale des Chemins de Fer*, Empresa Nacional de los Ferrocarriles Franceses).

Sin embargo, esta lentitud, que al principio se debía a las reticencias de la SNCF para la implantación de este tipo de sistemas en sus líneas, se ha transformado en un gran interés hacia ellos, de tal manera que se están estudiando de forma

conjunta para todo el país. Este hecho ha dado lugar al establecimiento de un pliego de condiciones para los vehículos, común para todas las explotaciones de tranvitrén, de forma que se pueden aprovechar las economías de escala de una oferta conjunta. Por otra parte, se ha establecido un criterio común para determinar la seguridad de estos sistemas, de forma que no es necesario realizar un nuevo planteamiento para cada nueva explotación.

Alguno de los casos que se presentan como tranvitrén por parte de la SNCF, y que se estudiarán en este apartado, consisten, en realidad, en una utilización de vías ferroviarias que no están siendo utilizadas en la actualidad por tráfico ferroviario convencional. Sin embargo, debido a la vocación de ampliación de dichas explotaciones hacia vías que realmente serán de tráfico compartido, se incluyen igualmente.

En la figura 3.20 se muestran los proyectos de tranvitrén planificados en Francia a finales del año 2002 [11].

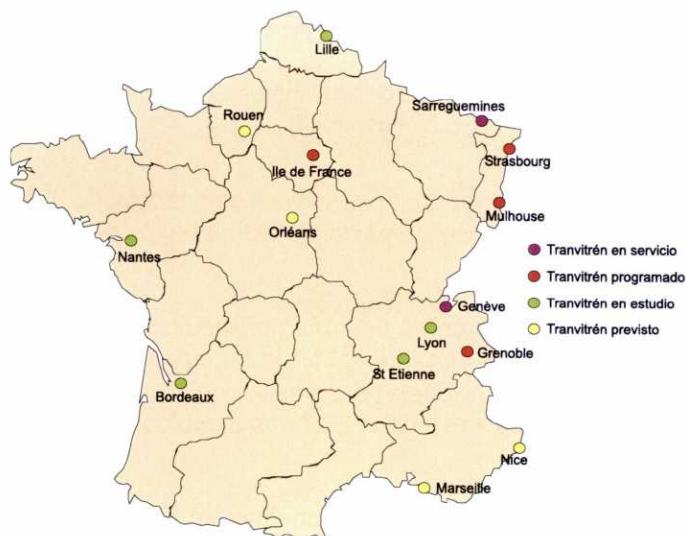


Figura 3.20: Situación de los proyectos de tranvitrén en Francia a finales del año 2002. Fuente: [11].

3.1. TRANVITRÉN GENÈVE – BELLEGARDE

3.1.1. Introducción

La población de Genève asciende a 400 000 personas, mientras que la de Bellegarde es de más de 30 000 habitantes, de los cuales 2 700 van diariamente a Suiza para trabajar. Una parte importante de población trabaja en la zona indus-

trial genovesa de Satigny – Vernier – Meyrin, situada entre Genève y la frontera francesa [38].

El servicio ferroviario clásico no es una opción atractiva con respecto al vehículo privado, ya que obliga a pasar por Genève Cornavin y realizar el control de aduanas y de policía. Por ello, hasta la puesta en marcha del servicio metropolitano en 2001, el reparto modal era de tan sólo el 10% para este servicio.

3.1.2. Servicio de tranvitrén

Por los motivos expuestos en el apartado anterior, en 1996 se lanza la idea de mejorar el servicio transfronterizo, prolongando el servicio Genève – La Plaine hasta Bellegarde. Se decidió, en principio, que dicho servicio fuese prestado por la CFF (*Chemins de fer fédéraux suisses*) con su personal. En una segunda etapa, cuando la demanda sea mayor, la SNCF entrará también a formar parte del servicio.

El servicio se puso en marcha en septiembre de 2001 (con retraso respecto a la fecha prevista, que era diciembre de 2000), y las paradas son: Bellegarde y Pougny-Chance en Francia; y La Plaine, Russin, Satigny, Zimeysa, Vernier-Meyrin, Cointrain y Genève-Cornavin en Suiza (véase la figura 3.21). La línea tiene 35 km, de los cuales 18 discurren por territorio francés. El tiempo de recorrido de Bellegarde a Genève-Cornavin es del orden de 40 minutos [8].



Figura 3.21: Línea de tranvitrén de Genève.
Fuente: [11].

En particular, para la mayoría de la clientela que trabaja en la zona industrial genovesa de Satigny – Vernier – Meyrin, se han conseguido tiempos de recorrido muy favorables, del orden de 30 minutos, gracias a que los controles aduaneros y de policía se realizan en el propio vehículo.

3.1.3. Vehículo

El vehículo utilizado es de Vevey (Bombardier), muy parecido en su concepción al tranvía del suroeste de Lausanne (TSOL). Sobre este vehículo se han realizado mejoras relativas a los sistemas de seguridad a bordo y a la resistencia al fuego, dado que en la línea se circula por un túnel de 4 kilómetros.

Estos vehículos funcionan bajo 1 500 V CC, pero están provistos de un motor diesel auxiliar que permite su circulación de manera autónoma, para casos de líneas con una alimentación diferente o sin electrificación.

Cada vehículo está constituido por dos unidades conectadas entre sí mediante una articulación. Los dos bogies de los extremos son motores, mientras que el central es portador.

Cada unidad tiene 250 plazas, de las que 80 son para ir sentado.

3.2. TRANVITRÉN AULNAY-SOUS-BOIS – BONDY

La línea Aulnay – Bondy, creada en 1875, se encuentra en la actualidad encerrada dentro del tejido urbano. Ha servido de soporte a la red viaria, y se encuentra a día de hoy encajonada entre calles pavimentadas en una larga parte de su recorrido.

Esta línea, de 8 km de longitud, sufre los siguientes problemas [17]:

- ☐ un servicio insuficiente y un tráfico que está desapareciendo;
- ☐ un número importante de pasos a nivel (11 con vehículos rodados y 3 con peatones), que provocan problemas sobre la fluidez del tráfico rodado, a pesar de las mejoras realizadas en 1995, que han disminuido en un 26% los tiempos de cierre de estos pasos a nivel (mediante reducciones de velocidad en la línea);
- ☐ un efecto de corte urbano que conduce a la degradación de la imagen del medioambiente urbano y a problemas de seguridad.

La modernización de esta línea figura en los proyectos incluidos en el acuerdo Estado – Región de Île de France 2000-2006. Esta línea ferroviaria se adaptará a una explotación clásica tranviaria por 41,8 millones de euros [6].

Para el futuro están planificadas tres extensiones: dos urbanas, hacia el norte en Aulnay y hacia el este en Clichy-sous-Bois, que tienen grandes posibilidades de ejecutarse; y una tercera, de 1 200 m, hacia el oeste, uniendo Bondy y Noisy-le-Sec (este tramo ya se utilizará desde el primer momento para llevar los vehículos a cocheras, y en él se compartirá la línea con los vehículos ferroviarios convencionales).

Esta línea se pondrá en servicio en el año 2005 y abarcará una zona con 270 000 habitantes, con un tráfico esperado de 40 000 viajeros/día, frente a los 10 000 viajeros/día actuales. Las principales medidas para remediar los problemas de la línea serán:

- ☐ Realizar un servicio con mayor número de paradas, más frecuente, y con una mayor adaptación a las necesidades de los clientes.
- ☐ Reemplazar todos los pasos a nivel por cruces con semáforos con prioridad del tranvitrén para no perjudicar los tiempos de viaje, pero limitando la velocidad del mismo a 30 km/h en la aproximación a los cruces. El tiempo necesario para el paso del tranvitrén por un cruce, y por tanto, de cierre de la circulación para los vehículos particulares, será de 15 segundos, frente a los 1 a 2 minutos necesarios en la actualidad para el paso del vehículo ferroviario convencional.
- ☐ Atenuar el efecto de corte, gracias a un trabajo de inserción urbana de la línea.

Debido a las actuales restricciones de velocidad en la línea para reducir el tiempo de cierre de los pasos a nivel, el tiempo de recorrido entre Aulnay y Bondy es de 21 minutos, lo que equivale a una velocidad comercial de 23 km/h. Tras la transformación de la línea el tiempo de viaje pasará a ser de 19 minutos [6].

La alimentación eléctrica mediante línea aérea de contacto se realiza a una tensión de 25 kV 50 Hz.

La línea es, en la actualidad, de vía única en el tramo entre Gargan y Aulnay (4 km), pero en las obras de transformación de la misma se incluye el paso de este tramo a vía doble. Este cambio permitirá obtener un aumento radical en la frecuencia de la línea, pasando de frecuencias de media hora y un cuarto de hora, a frecuencias de 4 minutos en horas punta y 6 minutos fuera de punta. El servicio se prestará desde las 4:00 h hasta la 1:00 h [17].

Las paradas están muy cercanas, con una media de 600 m. Cada punto de parada será dotado con dos andenes de 80 m de longitud, y con un equipamiento orientado al servicio tranviario: mobiliario, billética (distribuidor automático de billetes y validador), horario, sistema de información en tiempo real, etc. La altura del andén será de 385 mm sobre el nivel superior del carril para permitir un acceso a nivel al vehículo.

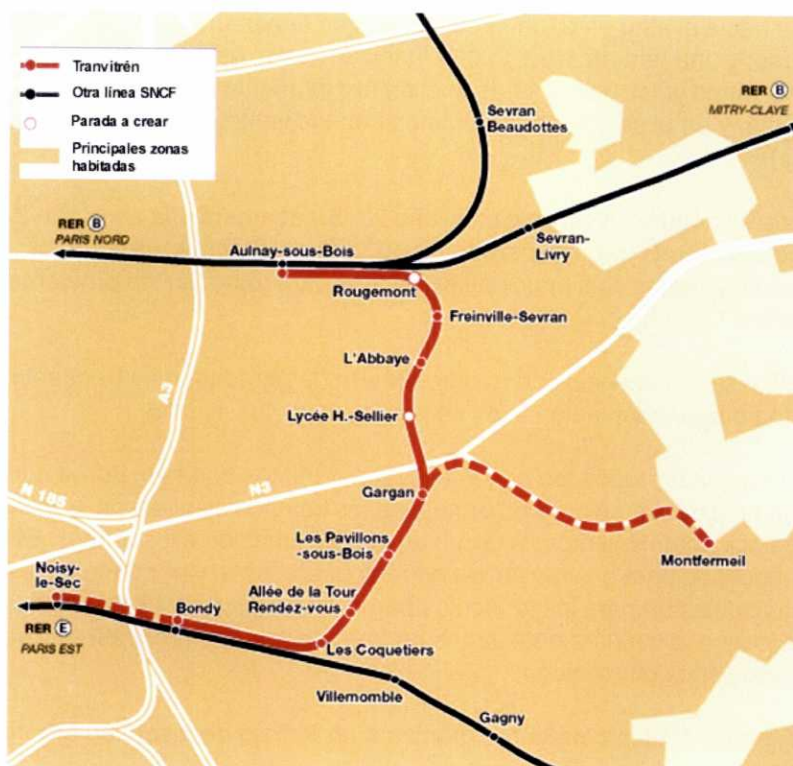


Figura 3.22: Línea Aulnay - Bondy.

Fuente: [11]

La circulación de los tranvitrenes estará regulada desde un puesto de mando, situado en Gargan, y dotado de un SAEIV (sistema de ayuda a la explotación y a la información de los viajeros), que es un equipamiento estándar en las redes tranviarias.

3.3. TRANVITRÉN STRASBOURG – BRUCHE – PIÉMONT

3.3.1. Introducción

La ciudad de Strasbourg, además de ser la capital administrativa regional, es la sede de una universidad con 50 000 estudiantes, y presenta una relación empleos/trabajadores elevada, por lo que produce una gran atracción sobre la región. Además, la aglomeración está rodeada de una zona residencial dispersa y de polos urbanos de tamaño medio en los que la población crece más rápidamente que en el centro urbano. Paralelamente, los empleos siguen muy concentrados en el centro. Por todo ello, se producen elevadas tasas de desplazamientos diarios (más de 50 000 empleos de la urbanización están ocupados por trabajadores que viven en las afueras). Estos desplazamientos se producen en vehículo particular, con los consiguientes problemas de congestión.

Por otro lado, la aglomeración está dotada con una gran cantidad de vías ferroviarias en su entorno, con cinco líneas, soportando servicios que generan diariamente más de 35 000 movimientos de pasajeros en la estación central de Strasbourg. El problema que se planteaba era cómo utilizar la red ferroviaria para ofrecer una alternativa de transporte colectivo a los habitantes del área metropolitana que no se pueden beneficiar ni de los servicios interurbanos del tipo TER ni de la red tranviaria urbana.

Por este motivo, en 1996, un grupo de trabajo constituido por la región de Alsace, la CUS (*Communauté Urbaine de Strasbourg*, Comunidad Urbana de Strasbourg), la SNCF y la CTS (*Compagnie de Transports Strasbourgeois*, Compañía de Transportes de Strasbourg), decide lanzar y cofinanciar un estudio exploratorio denominado “Estudio de viabilidad comercial y técnica de servicios ferroviarios periurbanos”. Este estudio está destinado a:

- ☐ precisar las dimensiones y las características del área metropolitana;
- ☐ evaluar las potencialidades de desplazamiento por eje;
- ☐ identificar las respuestas adaptadas en términos de oferta y de articulación con la red urbana;
- ☐ identificar y analizar las principales restricciones y dificultades;
- ☐ aclarar las opciones y las decisiones para una primera realización técnica.

Como conclusión de este estudio se vio que la vía ferroviaria de Molsheim (Sur-Oeste) conjuga un fuerte potencial con una reserva de capacidad sustancial, dando además servicio al aeropuerto de Strasbourg/Entzheim.

Por otra parte, el estudio demostró el interés primordial de la interconexión para mejorar los tiempos de recorrido suprimiendo los transbordos entre ferrocarril y tranvía en la estación de Strasbourg.

Sobre la base de este estudio la CTS y la SNCF realizan la propuesta de un servicio que conecte la línea ferroviaria de Molsheim con el servicio de tranvías del campus, que es objeto de un estudio de viabilidad y financiero.

3.3.2. Descripción del proyecto

El proyecto propone la unión directa entre Piémont des Vosges (Obernai, Barr) y el valle de Bruche (Gresswiller, Mutzig) con el centro urbano de Strasbourg y con el distrito universitario de Esplanade. La zona servida tiene una población de alrededor de 100 000 habitantes y 40 000 empleos (aparte de los de la aglomeración de Strasbourg) [19].

Para ello, el tranvitrén recorrerá 44 km dispuestos de la siguiente forma:

- ☐ un tramo sobre la línea B/C de tranvía (puesta en servicio en septiembre de 2000), de 2,8 km;
- ☐ un tramo de interconexión que se debe crear entre la línea C del tranvía y la estación de Strasbourg, de 1,2 km;
- ☐ por último, un tramo de línea ferroviaria utilizada por vehículos ferroviarios convencionales de viajeros y de mercancías. Esta línea actualmente es de vía doble no electrificada entre la estación de Strasbourg y Molsheim (19 km), y de vía única no electrificada entre Molsheim y Gresswiller (6 km) y entre Molsheim y Barr (15 km).

A lo largo de este recorrido se tendrá un total de 32 paradas, de las cuales [5]:

- ☐ 14 son puntos de parada actuales de la SNCF;
- ☐ 10 son estaciones de nueva creación o desplazadas en la zona metropolitana;
- ☐ 8 estaciones urbanas de tranvía.

Las principales fases previstas para el proyecto son las siguientes [5]:

- ☐ 1999-2001: estudios de viabilidad;
- ☐ 2001-2002: estudios preliminares de anteproyecto;
- ☐ 2002-2004: fase de anteproyecto;
- ☐ 2004-2005: fase de encuesta y fase de proyecto;
- ☐ finales 2005: declaración de utilidad pública;
- ☐ 2005-2008: fase de construcción;
- ☐ 2006-2008: producción del material móvil;
- ☐ finales 2008: puesta en servicio.

3.3.3. Explotación

La oferta consistirá en un tranvitrén cada media hora en período de punta hacia Piémont des Vosges y el Valle de Bruche, lo que implica un servicio cada cuarto de hora en el tronco común Strasbourg – Molsheim, con refuerzos complementarios en los períodos de hiperpunta. El aeropuerto de Strasbourg/Entzheim tendrá un servicio cada cuarto de hora durante todo el día.

El período de servicio será de 5:30 h a 23:30 h. Los usuarios tendrán ahorros de tiempo del orden de 10 minutos para llegar al centro de Strasbourg y al barrio de Esplanade [19].

El tranvitrén estará integrado con un sistema intermodal de transportes colectivos con:

- ☐ el mantenimiento de los servicios de trenes TER directos hacia el Valle de Bruche y Piémont;
- ☐ correspondencias adaptadas con los transportes urbanos y los autobuses interurbanos;

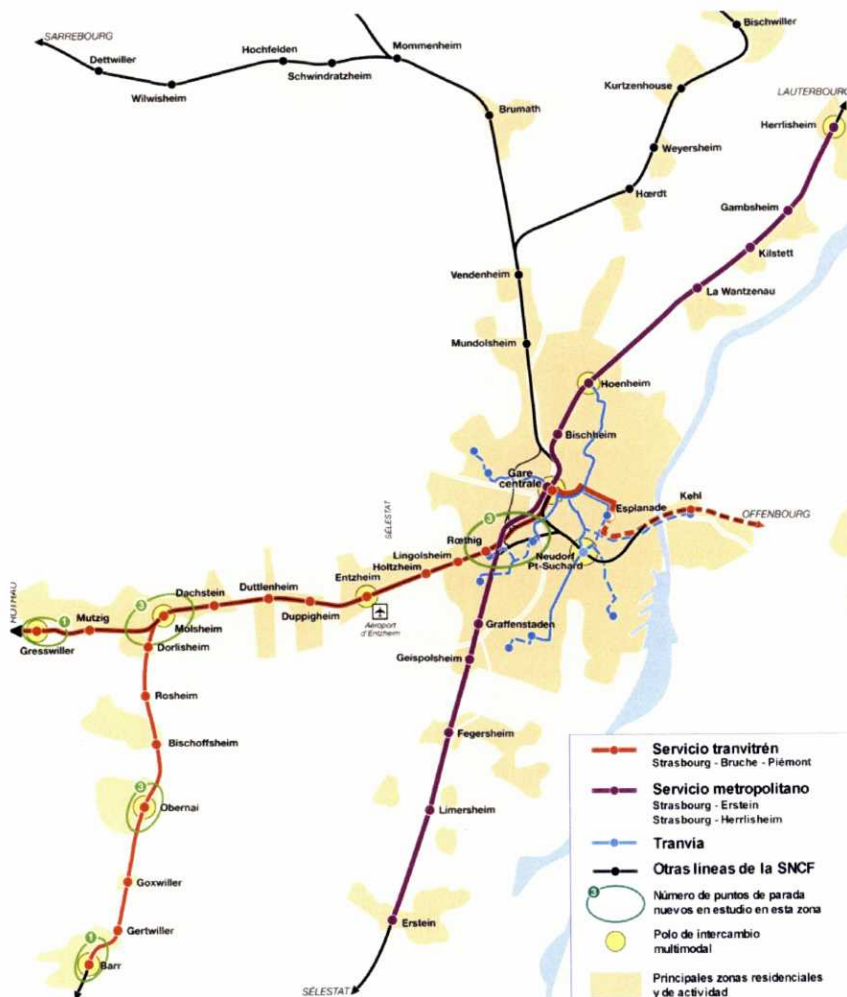


Figura 3.23: Red de Strasbourg.
Fuente: [11]

- ☐ tarificación común;
- ☐ polos de intercambio multimodal (trenes, tranvitrenes, autobuses, vehículos privados, bicicletas, etc).

Para dar el servicio será necesario contar con 14 vehículos, de los cuales 12 son para explotación, uno de reserva de explotación y otro de reserva de mantenimiento.

3.3.4. La S.I.B.S.

La SIBS (*Société d'Intermodalité du Bassin Strasbourgeois*, Sociendad de Intermodalidad del Bajo Strasbourg) es una sociedad anónima que se creó en abril de 2000 con un capital de 182 000 euros. Las empresas que participan en esta sociedad son: SNCF, con un 50%; Transdev (*Société Européenne pour le Développement du Transport Public*, Sociedad Europea para el Desarrollo del Transporte Público), con un 25%; y CTS, con el 25% restante.

La misión principal de la SIBS es la preparación para la implantación del tranvitrén, de tal manera que se garantice la explotabilidad, la coherencia y la eficacia comercial de dicho sistema. A este objeto, realiza una asistencia en la elaboración de estudios detallados sobre la operatividad e interoperabilidad entre la red urbana y regional, así como sobre la adaptación del futuro material rodante a las infraestructuras y a los equipamientos existentes, tanto sobre las vías ferroviarias regionales como sobre las vías tranviarias.

En la actualidad, las misiones de esta sociedad son [42]:

- ☐ Realización de estudios de transporte y de intermodalidad.
- ☐ Realización de estudios tarifarios.
- ☐ El seguimiento de las misiones de organización, información, comunicación, animación y promoción de proyectos intermodales.
- ☐ La realización de operaciones comerciales, industriales, financieras, e inmobiliarias relacionadas con el transporte público de viajeros.

3.3.5. Costes

Los costes del proyecto serán los siguientes [5]:

- ☐ Interconexión del "Tunnel de la Poste", incluyendo la vía, el balasto, los aparatos de vía, señalización, telecomunicaciones, pasos a nivel, electrificación, andenes, etc.: 151,6 millones de euros.

- ☐ Interconexión urbana, con las operaciones de acompañamiento, equipamiento de las estaciones, etc.: 43,6 millones de euros.
- ☐ Acondicionamiento de las estaciones de la SNCF existentes, equipamiento de las mismas, mejora de la intermodalidad y de la accesibilidad, etc.: 8,8 millones de euros.

3.3.6. Resultados

Se estima que la demanda será de más de 18 000 viajeros por día en tranvitrén, y más de 4 000 que se mantendrán en TER, cifras que se pueden comparar con los 8 000 viajeros por día que asumen actualmente los TER [19].

De los 18 000 más de la mitad provendrían de actuales usuarios del vehículo privado.

3.4. OTROS PROYECTOS DE TRANVITRÉN EN FRANCIA

3.4.1. Mulhouse

Mulhouse se encuentra situada en un valle rural estrecho en el que viven 60 000 personas, con empresas industriales que cada vez necesitan menos personal, lo que obliga a los habitantes de la zona a ir a trabajar a la ciudad. Esto hace que el único eje viario de entrada a Mulhouse soporte un tráfico de 20 000 vehículos por día [35].

Por ello, se pretende establecer una red de tranvías con dos líneas urbanas, y una línea metropolitana sobre la que circulará el tranvitrén que unirá Mulhouse con Kruth (véase la figura 3.24). La puesta en servicio del sistema está prevista para el año 2007.

Las líneas urbanas serán las siguientes:

- ☐ este-oeste: Illzach-Modenheim - Porte Jeune - Mulhouse, barrio de Co-teaux
- ☐ norte-sur: Wittenheim - Porte Jeune - Mulhouse, estación central.

El coste global del proyecto será del orden de 361 millones de euros para 56 km de red. De ellos, la realización de las dos líneas urbanas, con un total de 19 km, costará 270 millones de euros, mientras que la modernización de los 32 km de línea metropolitana costará 80 millones de euros [35].

La frecuencia será de 20 minutos en horas punta y de media hora el resto del tiempo. Según las previsiones, del orden de 13 000 viajeros utilizarán la línea metropolitana cada día (mientras que la línea de la SNCF actual la utilizan sola-

mente 350 personas al día). Por su parte, las dos líneas urbanas transportarán 84 000 personas por día [35].

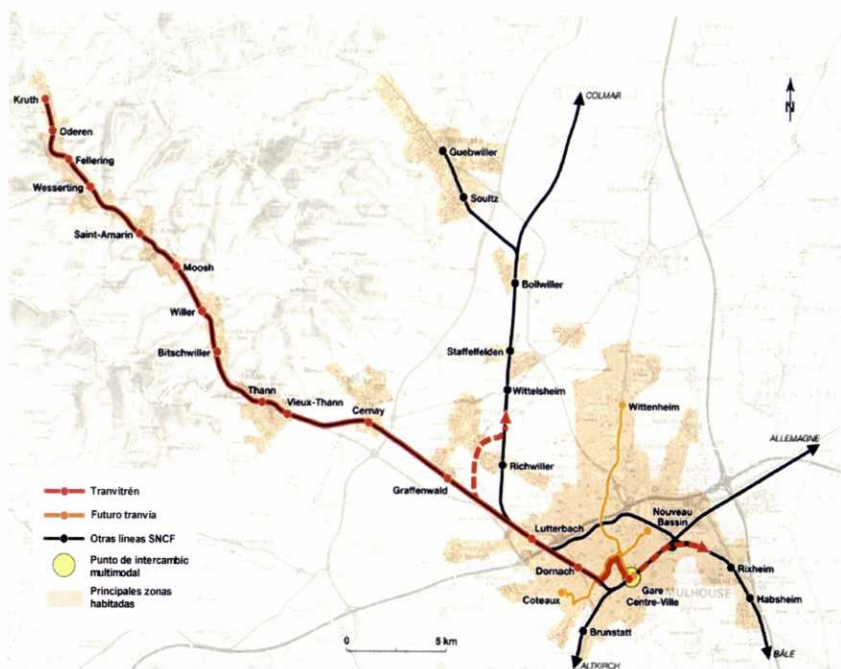


Figura 3.24: Red de tranvitrén de Mulhouse.
Fuente: [11].

3.4.2. Grenoble

Grenoble es una ciudad situada en la confluencia de tres valles, con una urbanización creciente de la zona metropolitana. Grenoble está constituida por 23 distritos, que en total tienen una población de 375 000 habitantes, que se mantiene más o menos constante, y alberga del orden de 180 000 empleos. Por otra parte, el área metropolitana está constituida por 134 distritos, con 250 000 habitantes en total (aunque esta cifra va en aumento), y alberga 70 000 empleos [35].

Este desequilibrio poblacional y de empleo hace que cada día se produzcan fuertes desplazamientos pendulares, de tal forma que 40 000 personas entran en la ciudad entre las 7:00 y las 9:00 h por motivos de trabajo o de estudio. Este hecho da lugar a una gran saturación de las carreteras de acceso y calles en las horas punta.

Por otra parte, en Grenoble existen dos líneas tranviarias en funcionamiento y una tercera cuya puesta en servicio está prevista para el año 2005. Además, en la zona metropolitana existen líneas ferroviarias sobre cada uno de los tres valles.

Es la asociación para el desarrollo del transporte público de Grenoble, llamada ADTC (*Association pour le Développement des Transports en Commun*), y creada en 1974 para fomentar el desarrollo del transporte público y de los modos suaves (marcha a pie, bicicleta), la que lanza por primera vez, en 1997, la idea de la implantación de un tranvitrén en Grenoble. El esquema de la red planteada se puede ver en la figura 3.25 [28].



Figura 3.25: Red de tranvitrén de Grenoble.

Fuente: [11].

Las principales fases del proyecto son las siguientes [28]:

- ☐ 1997: idea lanzada por la ADTC;
- ☐ 1998: un estudio de la GART (*Groupement des Autorités Responsables des Transports*) inscribe a Grenoble como ciudad que puede acoger la implantación de una red de tranvitrén;
- ☐ 2000: se incluye el tranvitrén en el PDU (*Plan de Déplacements Urbains*);
- ☐ 2000: se prevé un presupuesto de 35 millones de euros en el contrato Estado-Región 2000-2006 para el desarrollo del transporte metropolitano de Grenoble;
- ☐ 2001-2002: se realiza un estudio conjunto entre la SMTC (*Syndicat Mixte Transports en Commun*) y la Región Rhône-Alpes sobre la red ferroviaria de Grenoble;
- ☐ 2007: puesta en servicio de la primera línea de tranvitrén.

Además de las ciudades francesas citadas, existen otras, como Lyon, Nantes, Lille, etc., en las que se plantea la implantación de sistemas de tranvitrén, sin embargo, el grado de avance y definición de estos proyectos es menor, y por ello no se ha creído necesario incluirlos en este apartado.

3.5. MATERIAL MÓVIL DEL TRANVITRÉN FRANCÉS

En Francia ha realizado un pliego de condiciones general para la adquisición del material de tranvitrén, de tal manera que se consiguen economías de escala debido a los mayores volúmenes de pedidos que se pueden alcanzar refiriéndose a todas las explotaciones francesas.

Las características principales del material móvil definidas en dicho pliego de condiciones son las siguientes [10]:

- ☐ modularidad del diseño y conformidad con las características que se elijan de forma local;
- ☐ nivel de ruido equivalente al de los tranvías de Lyon, Montpellier y Strasbourg, a pesar de la potencia superior de los vehículos;
- ☐ aire acondicionado;
- ☐ longitud: 30 m en las versiones cortas y 40 m en las largas;
- ☐ capacidad: 200 plazas en las versiones cortas y 250 en las largas;

- ☐ 40% de plazas sentadas;
- ☐ 50% de piso bajo;
- ☐ posibilidad de funcionar en unidades múltiples;
- ☐ ancho: de 2,40 a 2,65 m;
- ☐ ancho de asientos: de 450 a 490 mm;
- ☐ aceleración media: 1 m/s^2 de 0 a 40 km/h;
- ☐ deceleración media en servicio: $1,3 \text{ m/s}^2$ de 70 a 0 km/h;
- ☐ velocidad máxima: 100 km/h sobre la red de la RFN (*Réseau Ferré National*) y 70 km/h en zona urbana;
- ☐ alimentación eléctrica bicorriente 750 V CC y 25 kV CA (versión básica); otras versiones monocorriente, tricorriente, y bicorriente con otros valores
- ☐ accesibilidad general al vehículo con un dispositivo para salvar la distancia vehículo-andén, de tal manera que se cumplan las siguientes condiciones:
 - desnivel $\leq 5 \text{ cm}$;
 - distancia horizontal $\leq 7,5 \text{ cm}$ en zona urbana y $\leq 10 \text{ cm}$ sobre RFN;
- ☐ carga máxima por eje: 11,5 t;
- ☐ resistencia longitudinal: 600 KN;
- ☐ es deseable la implantación de un dispositivo de absorción de energía en los testeros.

Con este pliego de condiciones se ha hecho una petición de ofertas, lanzada en febrero de 2001, resultando finalmente adjudicataria la empresa Siemens, con un pedido de 15 unidades para el tranvitrén de Aulnay-Bondy, con opción de 20 adicionales, con fecha de entrega 2004-2005 [21].

Aunque todavía no está absolutamente decidido el aspecto exterior que se le dará al vehículo, será similar al que se presenta en la figura 3.26.

4. EL TRANVITRÉN EN EL REINO UNIDO

En el caso particular del Reino Unido, cuando empezó a surgir interés acerca de las experiencias de tipo Karlsruhe, no era necesario considerar los sistemas tranviarios existentes, dado que había muy pocos y se estaban desarrollando en ese



Figura 3.26: Tranvitrén francés (Avanto de Siemens).

Fuente: [21].

momento un nuevo conjunto de normas de seguridad de aplicación a los sistemas de metro ligero. Este interés coincidió en el tiempo con un nuevo planteamiento de la seguridad ferroviaria, que ya no se basa solamente en la seguridad pasiva de los vehículos.

El planteamiento de sistemas de tranvitrén se ha visto favorecido, en este caso, por la privatización ferroviaria en el Reino Unido, que ha establecido un marco de actuación y unos procedimientos para permitir que autoridades independientes operen los vehículos ferroviarios sobre infraestructura ferroviaria que no es de su propiedad ni está controlada por ellos. Con la privatización se han establecido procedimientos para la aceptación de vehículos en una red.

En el Reino Unido han desarrollado unas normas nacionales para el establecimiento de sistemas de tranvitrén, que son:

- ❑ GE/GN8502 *“Operation of Trams and Light Rail or Metro Vehicles Over Railtrack Controlled Infrastructure”*.
- ❑ GM/RT2452 *“Acceptance of Trams and Light Rail or Metro Vehicles for Shared Running on Railtrack Controlled Infrastructure”*.

Aún así, los vehículos de tranvitrén deberán demostrar que cumplen con otras Normas de Railtrack (*Railway Group Standards*) o que proporcionan un nivel equivalente de seguridad, pero estos dos documentos establecen unas exenciones de ciertas normas que no se han considerado apropiadas para el tranvitrén [23].

4.1. SUNDERLAND METRO

4.1.1. Introducción

La empresa Tyne and Wear Metro llevaba desde 1990 estudiando la posibilidad de extender su sistema de metro hasta la ciudad de Sunderland, que era la única

de las cinco ciudades del distrito de Tyne and Wear que no disponía de un sistema de este tipo. Los objetivos que se planteaban eran:

- ☐ desarrollar una extensión del metro existente que fuese eficiente y viable económicamente, mediante el uso de las infraestructuras ferroviarias y de metro ya existentes, y con la utilización del material móvil de que se disponía;
- ☐ mejorar la accesibilidad proporcionando conexiones directas entre los centros urbanos de Newcastle y Sunderland;
- ☐ proporcionar una nueva línea atravesando el centro de Sunderland;
- ☐ apoyar el desarrollo y regeneración de la región de Tyne and Wear proporcionando conexiones directas por metro entre Sunderland y las principales terminales aéreas y ferroviarias de la región.

Sin embargo, el principal obstáculo que siempre se planteaba para la extensión era el coste de líneas de nueva construcción para metro. Por ello, la opción de utilizar vías ferroviarias existentes se planteó como la solución más apropiada.

4.1.2. La línea

Las obras comenzaron en febrero de 2000, y en mayo de 2002 se inauguró el metro de Sunderland, que es el primer ejemplo de circulación sobre vías compartidas en el Reino Unido. Técnicamente se trata de un sistema de metro, pero más ligero que el convencional (los vehículos no están preparados para circular por la calle, aunque tienen algunas características de metro ligero).

El metro de Sunderland se une con el sistema existente en Pelaw, y circula sobre la infraestructura de la Railtrack hasta Sunderland, continuando después hasta la estación terminal de South Hylton en una línea propia de nueva construcción (véase la figura 3.27). La longitud total de este nuevo tramo es de 18,5 km, mientras que la línea existente tenía una longitud de 59 km. De ellos, 6,4 km circulan en túnel bajo los centros de Newcastle y Gateshead [44].

El número de estaciones aumentará en doce con la prolongación de la línea. De ellas, ocho serán de nueva creación: tres de ellas entre Pelaw y Sunderland, dándole servicio al Estadio de la Luz, y cinco entre Sunderland y South Hylton. Las cuatro estaciones ferroviarias existentes en el tramo se mejorarán para cumplir los estándares de metro.

Dado que el sistema de Tyne and Wear Metro tenía suficiente número de vehículos (90), no ha sido necesaria la compra de nuevo material móvil, por lo que no se han tenido que homologar estos vehículos, cuyo diseño tiene ya 20 años, para su circulación sobre vías de la Railtrack.

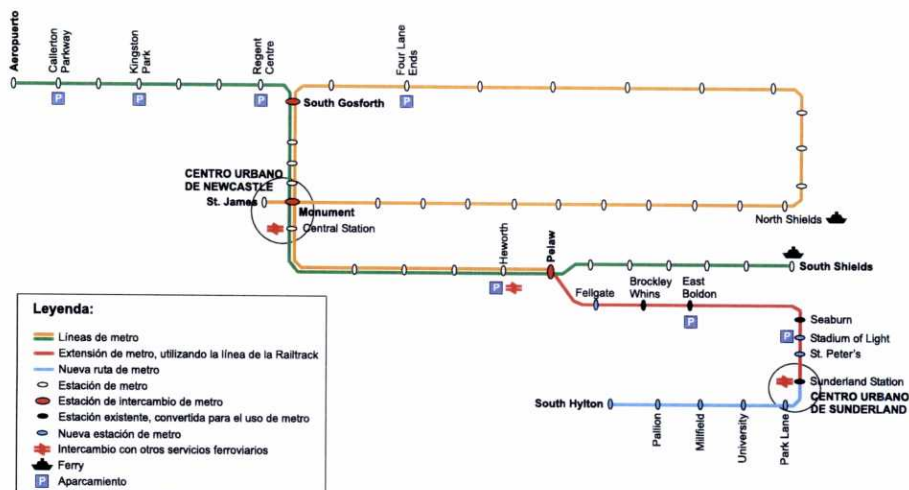


Figura 3.27: Red de metro de Sunderland.

Fuente: [C].

4.1.3. Explotación

La PTA (*Tyne and Wear Passenger Transport Authority*) es la propietaria de la infraestructura de metro, y la responsable de la prestación del transporte público. Tiene poderes para establecer horarios, frecuencias e incluso puede ejercer cierta influencia sobre el conjunto de tarifas locales, que en muchos casos subvenciona.

El servicio se extenderá desde las 06:00 h a las 23:00 h, con una frecuencia en hora punta de 6 trenes por hora, fuera de punta de cuatro trenes por hora, y en los momentos de menor demanda (el domingo por la mañana temprano) dos trenes por hora [44].

Se estima que el tráfico entre Newcastle y Sunderland pasará de los dos millones de viajes anuales actuales a unos diez millones [41].

4.1.4. Costes y financiación

El coste del sistema ha sido de 97,80 millones de libras, financiadas de la siguiente forma:

- ☐ 35 millones por el gobierno central del Reino Unido;
- ☐ 40,05 millones por la Railtrack;
- ☐ 14,76 millones de los Fondos de Desarrollo Regional Europeo;
- ☐ 7,99 millones por Tyne and Wear Passenger Transport Authority.



Figura 3.28: Metro de Sunderland sobre vías ferroviarias convencionales. Fuente: [23].

4.2. OTRAS EXPERIENCIAS INGLESAS

4.2.1. Nottingham

En la ciudad de Nottingham se propuso la utilización de un tramo de 8 km de una línea en la que se había suprimido el tráfico de pasajeros, aunque seguían manteniéndose servicios de mercancías. Sin embargo, antes de que el sistema comenzase a construirse se hizo un cambio en la explotación, con la reimplantación de servicios de pasajeros en la “Robin Hood Line”.

A pesar de que se habían concedido los permisos para la utilización de esta línea igualmente, el consorcio que se encargaba del desarrollo del proyecto decidió construir una línea paralela totalmente nueva para evitar riesgos.

Sin embargo, hay planes para la realización de futuras extensiones, y no se descarta la posibilidad de utilizar líneas ferroviarias en servicio.

4.2.2. Manchester

El sistema de metro ligero se introdujo en Manchester en el año 1992, con una ruta inicial que consistía en dos líneas ferroviarias metropolitanas convertidas en líneas tranviarias y unidas a través del centro urbano. Dado que la mayoría del sistema consiste en vías ferroviarias reconvertidas, se han mantenido algunas de las características ferroviarias, como el uso de andenes altos.

En la actualidad, la *Passenger Transport Executive* está llevando a cabo la tercera fase de ampliación de la red, que incluirá la conversión de varias líneas ferroviarias más. Una vez terminada dicha fase, se plantea la posibilidad de nuevas ampliaciones utilizando vías ferroviarias con explotación de tipo tranvitrén. Sin embargo, cuando se termine la tercera fase se habrá llegado a la saturación de las líneas tranviarias en el centro urbano, por lo que en caso de abordarse el sistema de tranvitrén tendría que disponer de sus propias líneas en el centro, aunque sería posible la integración de ambos sistemas.

4.2.3. Bristol

La empresa *Bristol and Gloucestershire Rapid Transit* pretende realizar una línea de metro ligero utilizando un tramo de 7 km de vías compartidas entre Bristol Temple Meads Station y Filton, con vehículos de tipo tranvitrén.

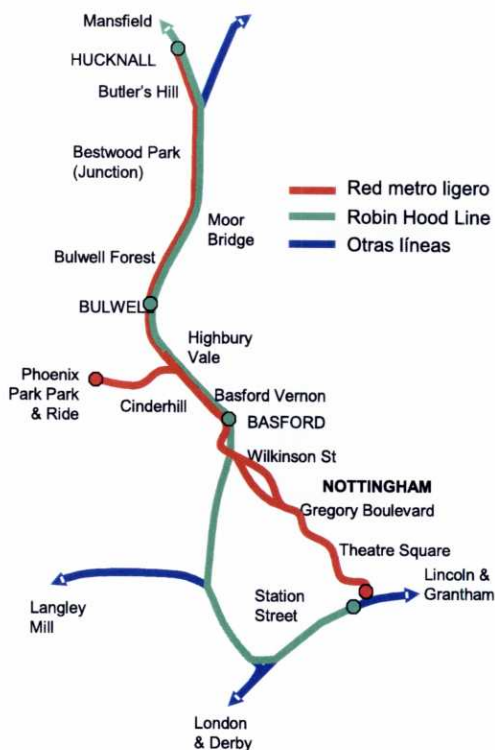


Figura 3.29: Línea de Nottingham.
Fuente: [21].

La principal particularidad de este caso consiste en que las líneas que se van a utilizar no existen actualmente. Este hecho se debe a que el tramo ferroviario considerado fue reducido de cuatro a dos vías en los años sesenta, por lo que se pretendían compartir las dos vías que quedaban, pero debido a los planes de expansión de varios operadores la Railtrack no puede permitirlo. Por ello, finalmente se propone compartir un par de vías de nueva creación, que serán utilizadas por los servicios ferroviarios locales, por el tranvitrén, y por ciertos servicios de mercancías. De esta forma se consigue también liberar capacidad en la línea principal, y aparece la posibilidad de utilización de estas vías como ruta desviada por la noche, cuando las vías principales estén en fase de mantenimiento.

El gobierno se ha comprometido a financiar este proyecto en caso de que se presente como rentable.

5. EL TRANVITRÉN EN ESPAÑA

En España hasta la actualidad sólo se ha planteado la implantación de un sistema de metro ligero aprovechando líneas ferroviarias convencionales existentes en Alicante, que no entrará en funcionamiento hasta finales del año 2005.

Los vehículos de metro ligero de Alicante circularán por una red tranviaria urbana de nueva creación, así como por las líneas de los Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana, formando una red constituida por dos líneas (véase la figura 3.30) [18]:

- ❑ Línea 1: entre el intercambiador modal de Renfe y el Campello, con un ramal al Cabo de Huertas y lanzadera a la Estación de la Marina.
- ❑ Línea 2: entre la Universidad de Alicante y La Goteta, con un segundo ramal al barrio de Babel.

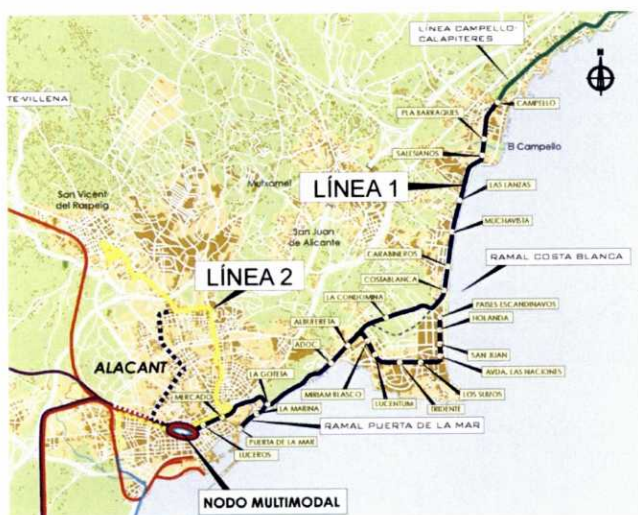


Figura 3.30: Red planteada para el "tranvitrén" de Alicante. Fuente: [G]

La red tendrá un total de 51 km y el coste total ascenderá a 500 millones de euros. La alimentación eléctrica será en 750 V CC y existirán, en total, 42 estaciones, de las cuales 3 serán subterráneas y las 39 restantes en superficie.

Para la explotación del metro ligero de Alicante se ha contratado a Alstom la construcción de 9 unidades de tranvitrén, bidireccionales, con capacidad de circular a una velocidad máxima de 70 km/h sobre las vías tranviarias y de 100 km/h sobre las vías ferroviarias. El contrato para estos nueve vehículos ha ascendido a 46 millones de euros. La entrega de los vehículos está previsto que comience en mayo de 2005 y terminará en octubre de ese mismo año.

Sin embargo, y a pesar de que al sistema de Alicante se le ha dado en llamar *tren-tram*, este sistema no se debería considerar un tranvitrén propiamente dicho, ya que las líneas ferroviarias utilizadas no soportan ya tráfico ferroviario convencional, por lo que se evitan varios de los problemas técnicos que hay que resolver en el caso de que se produzca circulación mixta de los dos tipos de vehículos (metro ligero y ferrocarril convencional). Como ejemplo de ello cabe destacar el hecho de que, para facilitar el acceso a los vehículos de metro ligero, se está procediendo a la modificación de los andenes a lo largo de toda la línea ferroviaria utilizada, sin contemplar la posibilidad de que en el futuro dichos andenes puedan volver a ser utilizados por vehículos ferroviarios convencionales.

6. TABLAS RESUMEN

En las páginas siguientes se presentan dos tablas, que, sin ánimo de ser exhaustivas, presentan las características de los sistemas de tranvitrén de varias ciudades en las que se ha planteado un sistema de este tipo para dar solución al transporte público. La tabla 3.1 incluye los sistemas de tranvitrén que ya existen, o están en construcción, o en avanzado estado de planificación (presentados con más detalle en los apartados anteriores), mientras que la tabla 3.2 incluye los sistemas que están en estado de planificación previa.

Ciudad	Población	Ancho vía FFCC (mm)	Ancho vía ML (mm)	Ancho vía TT (mm)	Tracción FFCC	Tracción ML	Tracción TT	Líneas férreas a utilizar	Tipo de tráfico ferroviario	Operador FFCC	Operador ML/tranvía	Operador TT
SISTEMAS DE TRANVITRÉN EN EXPLOTACIÓN, EN CONSTRUCCIÓN, O EN AVANZADO ESTADO DE PLANIFICACIÓN												
Karlsruhe	550000	1435	1435	1435	15 kV 16 2/3 Hz	750 V CC	750 V/15 kV 16 2/3 Hz	Karlsruhe-Bretten Karlsruhe-Wörth Karlsruhe-Pforzheim-Bietigheim-Blissingen Karlsruhe-Rastatt-Baden-Baden Breiten-Eppingen-Heilbronn Bruchsal-Menzingen/Odenheim	Pasajeros y mercancías	DB-Regio	AVG, VBK	KVV
Saarbrücken	500000	1435	no	1435	15 kV 16 2/3 Hz	750 V CC	750 V/15 kV 16 2/3 Hz	Brebach-Sarregrumines Old Kollertalbahn	-	DB-Regio, SNCF	-	Stadtbahn Saar GmbH
Kassel	200000	1435	1435	1435	-	600 V CC	-	Kassel-Baunatal Kassel-Helisa	Mercancías	RBK	KVG	-
Braunschweig	260000	1435	1100	1435	15 kV 16 2/3 Hz	-	-	Goslar/Bad Harzburg Braunschweig Salzgitter-Lebenstedt Braunschweig Helmstedt Wolfenbüttel Braunschweig Uelzen Wieren Gifhorn Braunschweig Wiphausen Braunschweig	-	DB-Regio	Braunschweig er Verkehr, AG	-
Heilbronn	320000	1435	1435	1435	15 kV 16 2/3 Hz	no existía	750 V/15 kV 16 2/3 Hz	Eppingen - Öhringen Zaferfeld - Neckaritz/Mosbach	-	DB-Regio	-	-
Aulnay - Bondy	-	1435	1435	1435	25 kV 50 Hz	no existía	750 V/25 kV	Aulnay-sous-Bois - Noisy-le-Sec	-	SNCF	-	-
Strasbourg	430000	1435	1435	1435	25 kV y no electrificadas	-	750 V/25 kV (1)	Esplanade-Molsheim-Obernai-Barr Molsheim-Gresswiller	Pasajeros y mercancías	SNCF	CTS	SIBS
Geneva	400000	1435	1000	1435 (2)	25 kV SNCF, 15 kV CFF	-	750 V/25 kV/15 kV	Coppel-Cornavin-Airport (CFF) Evian- Thonon-Annemasse-Eaux Vives (SNCF)	-	SNCF y CFF	TPG	SNCF y CFF
Sunderland	200000	1432	1435	1432 y 1435	no electrificadas	1500 V CC	1500 V	Pelaw-Sunderland	Pasajeros y mercancías	Northern Spirit	Nexus	Nexus
Alicante	300000	1000	1000	1000	no electrificadas	750 V CC	750 V	Alicante-Campello	-	Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana	Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana	Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana

(1) Tendrá que ser tracción si se extiende hasta Kohl

(2) Tercer carril en zona urbana o dispositivo de cambio de ancho

Tabla 3. 1: Sistemas de tranvitrén existentes, en construcción o en avanzado estado de planificación.

Ciudad	Población	Ancho vía FFCC (mm)	Ancho vía ML (mm)	Ancho vía TT (mm)	Tracción FFCC	Tracción ML	Tracción TT	Líneas férreas a utilizar	Tipo de tráfico ferroviario	Operador FFCC	Operador ML/tranvía	Operador TT
SISTEMAS DE TRANVITRÉN EN ESTADO DE PLANIFICACIÓN PREVIA												
Nantes	547000	1435	1435	1435	Ninguna (1)	750 V CC	750 V/25 kV	Haluchère - Sucé sur Erdre	Mercancías	SNCF	SEMITAN	-
Grenoble	375000	1435	1435	1435	25 kV	no existe	750 V/25 kV	Voyron - Grenoble Vizille - Grenoble Grenoble - Brignoud Crolles	-	SNCF	SMTG	-
Mulhouse	300000	1435	1435	1435	-	no existe	-	Wittelsheim - Mulhouse Kruhl - Mulhouse	-	SNCF	-	-
Kiel	240000	1435	1000 - eliminadas	1435	15 kV y no electrificadas	-	750 V/15 kV 50 Hz o 750 V/15 kV V/15 kV	Kiel-Neumünster (NOB & DB) Kiel-Plön (DB) Kiel-Eckernförde (DB) Kiel-Rendsburg (NOB)	Pasajeros y mercancías	NOB y DB	sistema tranviario eliminado en 1985	-
Bremen	540000	1435	1435	1435	15 kV CA	-	750 V/15 kV 50 Hz	Bremen-Deimelhorst-Nordentham Bremen-Rottenburg/Wünne	-	DR-Regio	-	-
Aarhus	282137	1435	no	-	no electrificadas	-	diesel- eléctrico	Odder Line Grenaa Line	-	HHJ en Odder y Danish National Railway Aarhus en	-	-
Göteborg	600000	-	1435	-	15 kV 16 2/3 Hz	750 V CC	-	Alingsås-Göteborg Floda-Göteborg	-	SJ	GS	-
Tallinn	411594	1520	1087	1520	3300 V CC	600 V (750 V nueva línea)	750/3300 V	-	Pasajeros y mercancías	Elektriraudtee AS Edeleaudtee AS	TTA	-
Aachen	500000	1435	nuevo plaseado 1435 mm	-	3300 V CC	750 o 1500 V CC	-	Aachen-Heerlen	-	-	-	-
Brussels	964000	-	-	-	3300 V CC	700 V CC	700/3300 V	-	-	SNCF/NMBS	STIB/MIVB	-
Anvers	590000	1435	1000	1435 (2)	3300 V CC	700 V CC	-	-	-	SNCF/NMBS	DE LUN	-
Katowice	400000	1435 y 1524	-	-	3000 V CC	-	-	-	-	-	-	-
Palra	200000	1000	no	1000	no electrificadas	-	diesel- eléctrico	Pasthopyghos-Patras-Achala	-	OSE	-	-
Valenciennes	332000	-	no - estudio para construirlo	-	-	750 V CC	-	Mons-Quikévrain-Valenciennes Mons-Borinage-St. Ghislain-Quikévrain- Valenciennes Mons-Cuesmes-Quikévrain-Quikévrain-Maubeuge	Pasajeros y mercancías	SNCF y SNCFB	-	-
Liverpool	450000	1435	no - propuesto	1435	750 V CC y 25 kV CA	-	750 V	-	-	-	-	-

(1) Deberá electrificarse

(2) Tres o cuatro carriles en zona urbana

Tabla 3.2: Sistemas de tranvitrén en estado de planificación previa.

7. EL TREN-TRANVÍA DE ZWICKAU

Zwickau es una ciudad situada en Sachsen (Sajonia), con una población de 125 000 habitantes. La ciudad ha mantenido su red de tranvías, a pesar de que hubo alguna época en la que se trató de cerrarlas. Sin embargo, esta política cambió a partir de la crisis del petróleo, reponiendo alguna de las líneas que se habían cerrado [48].

Tras la reunificación de Alemania, en 1989, se mejoraron los servicios tranviarios de Zwickau. En la actualidad existen en esta ciudad tres líneas tranviarias (3, 6 y 7), con una longitud total de 14,8 km. Los servicios se proporcionan con 35 vehículos [48].

Zwickau ha vuelto a hacer inversiones en su red recientemente, orientadas a la implantación de un tren-tranvía en sus calles. Desde finales de 1999 circulan por las líneas tranviarias de Zwickau trenes diesel de ancho 1 435 mm pertenecientes a la compañía ferroviaria regional *Vogtland Bahn*. Para ello ha sido necesario disponer, en las líneas implicadas, vías de tres carriles, ya que el tranvía es de ancho métrico.

Por estas líneas se produce, durante todo el día, una sucesión de tranvías y trenes que comparten las mismas vías, paradas y señalización.

Esto se ha podido conseguir debido a que las cajas ferroviarias son, en este caso, tan sólo 11 cm más anchas que las tranviarias, por lo que los trenes pueden penetrar en el centro urbano, utilizando dos paradas tranviarias, con una altura de andén de 20 cm, sin que se produzcan graves inconvenientes.

En el centro urbano, los trenes de la *Vogtland Bahn* se comportan prácticamente como tranvías, y están equipados con luces de freno similares a las del tranvía, intermitentes, y demás dispositivos necesarios.

Con este sistema se consigue que los pasajeros que llegan en el tren regional sean llevados directamente al centro urbano, en vez de bajarse en la estación central, situada a 1 km al oeste del centro.

La conexión desde la estación central al centro urbano, de 3,3 km, se realiza utilizando 1,3 km de vías tranviarias, y 1,5 km de un ramal ferroviario industrial en desuso (véase la figura 3.31). En este recorrido, el tren realiza una parada en Schedewitz, en una nueva estación llamada Glück-Auf-Center, que es un nuevo centro comercial [48].

Los trenes utilizados son de tipo RegioSprinter de Siemens, 18 en total, con una capacidad de 164 pasajeros, 86 de ellos sentados. La longitud del vehículo es de 25 metros, y pesa 32 toneladas. Se pueden acoplar dos unidades en mando múltiple.



Figura 3.31: Línea de tren-tranvía de Zwickau.

Fuente: [H].

En las figuras 3.32 y 3.33 se puede ver el RegioSprinter circulando por zona ferroviaria, y en una parada en zona urbana.

Una de las cuestiones que se plantearon antes de la implantación del sistema, era la posibilidad de aumento de las roturas en los carriles utilizados por los dos vehículos. Se vio que el tranvía producía mayores desgastes, debido a su mayor frecuencia (de diez minutos, pero que se duplicará a 5 minutos). Un estudio sobre el tema concluyó que los carriles tendrán una vida útil de 15 a 20 años sin tomar ninguna medida especial, lo que se consideró apropiado.

Se han instalado dispositivos de señalización electrónica para controlar los movimientos de los tranvías y los trenes. En la zona rural, los trenes pueden circular hasta 120 km/h, pero este límite se rebaja a 80 km/h en las zonas cercanas a la estación central, y finalmente, a 40 km/h en las vías compartidas con el tráfico tranviario. Por otro lado, en los tramos de circulación urbana los conductores de los trenes de la Vogtland Bahn están en contacto por radio con el centro de control.

La construcción de todo el sistema tuvo un coste de 89 millones de marcos (45,5 millones de euros).



Figura 3.32: RegioSprinter circulando en zona ferroviaria.



Figura 3.33: RegioSprinter en parada urbana.
Fuente: [A].

REFERENCIAS

- [1] ALLGEIER, H., LUDWIG, D., *Karlsruhe: The Karlsruhe model of a dual-mode railway*, 1996, European Academy of the urban environment.
- [2] AXHAUSEN, K.W., BRANDL, P.G., Dynamics of LRT growth: Karlsruhe since 1975, *Transport Reviews*, 1999, vol. 19, n° 3, pp. 221-240.
- [3] BERK, A., Planning and implementation of tram-train in Heilbronn, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [4] BERNHEIM, A., Le projet tram-train de l'agglomération mulhousienne, *Revue Generale des Chemins de Fer*, diciembre 2003, pp. 62-65. ISSN: 0035-3183.
- [5] BOLLER, A.-P., MÜLLER, G., Le projet de Tram-Train - T.T.S.B.P. Tram-train Strasbourg - Bruche - Piémont des Vosges, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [6] CARÉMANTRANT, M., Aulnay – Bondy: la ligne des Coquetiers va s'adapter au tram-train, *Rail Passion*, París, octubre 2002, n° 63, pp. 20-25. ISSN: 1261-3665.
- [7] CATLING, D., GUILLOUSOU, M., ROVERE, G., STEFANOVIC, V., *Easy of use of light rail systems*, París: UITP, 1995.
- [8] CHESSUM, R., Le tram-train Genève – Bellegarde en service, *Rail Passion*, París, octubre 2001, n° 52, pp. 8-9. ISSN: 1261-3665.
- [9] CHRISTELLER, R., Regio CITADIS™. Technik verbindet Stadt und Land, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [10] DEGAND, J.-C., Le périurbain : avancement d'une démarche partagée, *Revue Générale des Chemins de Fer*, diciembre 2001, pp. 13-18. ISSN: 0035-3183.
- [11] DEGAND, J.-C., L'introduction du Tram-Train en France, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [12] DEGAND, J.-C., L'introduction du tram-train en France, *TEC*, n° 174, noviembre-diciembre 2002.
- [13] DILLIG, G., Avanto: il tram-treno per la SNCF, *Ingegneria Ferroviaria*, Febrero 2003, pp. 163-168. ISSN: 0020-0956.
- [14] DRECHSLER, G., Karlsruhe trams cross more city boundaries, *Railway Gazette International*, Noviembre 1994, pp. 719-722. ISSN: 0373-5346.
- [15] DRECHSLER, G., Light railway on conventional railway tracks in Karlsruhe, Germany, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, London, 1996, n° 2, pp. 81-87.
- [16] DRECHSLER, G., Überblick über TramTrain – Projekte in Deutschland, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [17] ESPIEUSSAS, J.-L., ARNAL, E., "Le tram-train Aulnay-sous-Bois – Bondy, *Revue Générale des Chemins de Fer*, diciembre 2001, pp. 31-38. ISSN: 0035-3183.
- [18] GENERALITAT VALENCIANA, *Plan de Infraestructuras Estratégicas, 2004-2010*, 2003.

- [19] GEORJON, V., MENETEAU, A., Le tram-train Strasbourg – Bruche – Piémont, *Revue Générale des Chemins de Fer*, diciembre 2001, pp. 39-47. ISSN: 0035-3183.
- [20] GLASER, O., La filosofía del TramTrain. El modelo de Karlsruhe, *El tranvía de Alicante: un nuevo concepto de transporte metropolitano*, Alicante, 14 de abril de 2003.
- [21] GOTZIAN, H., Avanto. Tramtrain für Europa, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [22] GRIFFIN, T., Light rail transit sharing the Railtrack system, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, Londres, 1996, nº 2, pp. 98-103.
- [23] GRIFFIN, T., Tram Train United Kingdom, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [24] HAYDOCK, D., Saarbrücken's light rail system opens, *Light Rail Review*, Sheffield, Mayo 1998, nº 8, pp. 26-33.
- [25] HÉRISSÉ, Ph., Karlsruhe, conservatoire européen du tram-train, *Rail & Transports*, 6 de Noviembre 2002, pp. 16-21. ISSN: 1634-5851.
- [26] HÉRISSÉ, Ph., Le tramway à la mode de Karlsruhe, *La Vie du Rail*, 7 de Enero 1993, nº 2377, pp. 12-20.
- [27] HOPE, R., Saarbrücken to launch second dual-mode LRT in the autumn, *Railway Gazette International*, Sutton, 1997, nº 3, pp. 155-157.
- [28] JAMMES, A., Le tram-train dans la région grenobloise, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [29] KARLSRUHER VERKEHRSVERBUND, Plano de la red de Karlsruhe, publicado por *Karlsruher Verkehrsverbund*, 2002.
- [30] KASSELER VERKEHRS-GESELLSCHAFTAKTIENGESELLSCHAFT, Encuesta de elaboración propia realizada a la empresa Kasseler Verkehrs-Gesellschaft Aktiengesellschaft.
- [31] KEUDEL, W., La Saarbahn - Le nouveau système de transport urbain et régional sur voie ferrée de la région de Sarrebruck, *Transport Public International*, París, 1998, nº 4, pp. 25-31.
- [32] KEUDEL, W., Stadtbahn Saar: Die erste konsequente Umsetzung des "Karlsruher Modells" in einer Region ohne Straßenbahn, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [33] KLEEMEYER, M., Tramtrains in Braunschweig – finanzielle und planerische Gesichtspunkte, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [34] KREMPPER, M., "Où en est le Tram-train de Sarrebruck?", *CDR - Connaissance du Rail*, Valignat, Enero 1999, nº 210, pp. 11-17.
- [35] LE ROUX, A., Matériel: la mandature du tram-train. Mulhouse. Ruraux et citadins séduits, *La Vie du Rail*, 28 marzo 2001, pp. 37.
- [36] LUDWIG, D., BRAND, W., WALLOCHNY, F., GACHE, A., En matière de transports urbains et régionaux: Karlsruhe, un exemple à méditer..., *Chemins de Fer*, París, 5/1993, vol. 422, pp. 8-16.

- [37] MEYFAHRT, R., Tram-train revives Kassel network, *Railway Gazette International*, Diciembre 2002, pp. 779-780. ISSN: 0373-5346.
- [38] MOULIN, J., GAUDERON, P., La desserte tram-train Genève – Bellegarde: une réussite partagée, *Revue Générale des Chemins de Fer*, diciembre 2001, pp. 23-30. ISSN: 0035-3183.
- [39] MULLER, G., Karlsruhe. La place du tramway dans les dessertes régionales. Un exemple à suivre, *Revue Générale des Chemins de Fer*, París, Abril 1995, pp. 81-93. ISSN: 0035-3183
- [40] MUTH, F., Karlsruhe: back to the future, *Tramways and Urban Transit*, diciembre 2000, n° 756, pp. 452-455.
- [41] SCANRAIL CONSULT, DK, *Integrating local and regional rail, incl. cross-border aspects*, GROWTH Project GRD1-1999-10843 of FP5, 2001.
- [42] SOULET, J.-F., DECLERQ, A., Une première: la Société d'Intermodalité du Bassin Strasbourgeois (SIBS), *Revue Générale des Chemins de Fer*, diciembre 2001, pp. 49-54. ISSN: 0035-3183.
- [43] STROHM, E., WALTER, N., ERLINKÖTER, W., Stadtbahn Saar light rail system, *Network. The railways of Australia Quarterly*, Melbourne, 1994, vol. 31, n° 1, pp. 39-44.
- [44] SULLY, J., Royal opening for Sunderland Direct, *Modern Railways*, abril 2002, vol. 59, n° 643, pp. 31-35.
- [45] SUTTER, A., Interconnexion physique entre métro léger et réseau ferré national à Karlsruhe... et ailleurs, *Transports Urbains*, Octubre-Diciembre de 1994, n° 85, pp. 19-22.
- [46] VEINNANT, B., CACCIAGUERRA, F., Un tram-train nommé succès: l'exemple de Sarrebruck, *Revue Générale des Chemins de Fer*, París, 1998, 35-42, pp. 35-42. ISSN: 0035-3183
- [47] WALTER, N., STROHM, E., Saarbrücken. Through running promises cost-effective, *Developing Metros 1995. A Railway Gazette Yearbook*, Sutton, 1995, pp. 62-64.
- [48] WANSBEEK, C.J., Zwickau: A happy blend of tram and train, *Tramways and Urban Transit*, febrero de 2000, n° 746, pp. 52-55.
- [49] WOLFF, N., HASSELMANN, D., Planning the regional metro ("RSB") for Greater Braunschweig, *Railway Technical Review, RTR*, 2001, n° 1, pp. 16-23.

PÁGINAS WEB DE INTERÉS

- [A] A.D., *Der Zwickauer*, <<http://www.derzwickauer.de/regiosprinter.html>>, Página web sobre Zwickau.
- [B] A.D., *Kasseler Strassenbahn*, <<http://www.talknet.de/~toepel/regiotram/index2.htm>>, Página web sobre la red Regiotram de Kassel.
- [C] A.D., <<http://www.inform-rail.co.uk/sunderland/smap.htm>>, Plano con la red de metro de Sunderland
- [D] A.D., <<http://www.serm68.fr/ASP/SERM418.asp>>, Página web sobre el tranvía de Mulhouse.

- [E] CIUDAD DE KARLSRUHE, *Marier le trafic régional avec le trafic urbain. L'exemple frappant de Karlsruhe*, <http://www.karlsruhe.de/KVV/kama_f.htm>, Página web de la ciudad de Karlsruhe.
- [F] REGIOTRAM, *RegioTram Nordhessen*, <http://home.t-online.de/home/dr.menzel/rtn_f.htm>, Página web sobre el RegioTram de Kassel.
- [G] TRAM, <<http://www.tram-alicante.com>>, Página web de TRAM, Metropolitano de Alicante.
- [H] VOGTLAND BAHN, <<http://www.vogtlandbahn.de>>, Página web de la empresa Vogtland Bahn.
- [I] ZWECKVERBAND GROßRAUM BRAUNSCHWEIG, <<http://www.zgb.de>>, Página web de la Zweckverband Großraum Braunschweig.

Capítulo 4

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

I. INTRODUCCIÓN

Como se ha explicado anteriormente, un sistema de tranvitrén consiste en la prolongación de los servicios de metro ligero de una ciudad mediante la circulación de dicho metro ligero sobre vías ferroviarias convencionales existentes en la región, que se encuentren en servicio para los vehículos ferroviarios convencionales. De esta forma, se produce una situación en la que los vehículos ferroviarios convencionales comparten la vía con vehículos de tipo metro ligero, cuyas características son totalmente diferentes. Con este sistema se consigue extender la red de metro ligero hacia la periferia sin necesidad de crear nuevas infraestructuras específicas para ello.

En la presente Tesis se realizará un estudio acerca de la implantación de sistemas de tranvitrén en España, para el caso particular de las vías ferroviarias de FEVE.

2. MOTIVACIÓN DE LA ELECCIÓN DE LAS LÍNEAS FERROVIARIAS DE FEVE

2.1. ANCHO DE VÍA

A la hora de estudiar el establecimiento de sistemas de tipo tranvitrén en España, se pueden analizar, básicamente, dos posibilidades de implantación:

- ☐ sobre líneas de vía ancha: Renfe, metro de Madrid, metro de Barcelona, etc.;
- ☐ sobre líneas de vía estrecha: FEVE, ferrocarriles autonómicos, etc.

Evidentemente, en caso de que se esté estudiando la implantación del sistema en una ciudad en concreto, se deberá estudiar si hay posibilidad de utilización de las líneas ferroviarias existentes en el entorno de la misma, y en función de las características de dichas líneas se deberán determinar las adaptaciones tecnológicas necesarias para ese caso en concreto.

Por tanto, para realizar un estudio completo de las posibilidades de utilización de sistemas de tranvitrén en España habría que considerar los dos casos, con las particularidades técnicas de cada uno de ellos. En este sentido, la autora de la presente Tesis ha sido también uno de los autores del “Estudio sobre la compatibilidad de un sistema de metro ligero con la red de metropolitano y cercanías de Madrid”, financiado por la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología), y elaborado entre los años 2000 a 2002. En dicho estudio se investigaron las posibilidades de implantación del sistema de tranvitrén sobre las líneas ferroviarias de Cercanías de Renfe y de Metro de Madrid, pero, a pesar de lo que pueda indicar el título, no se limitó únicamente al caso particular de Madrid, sino

que, para el caso de Renfe, se obtuvieron conclusiones generales para todas las líneas ferroviarias de dicha empresa. Dicho estudio ha servido de base para la elaboración y redacción de parte de los capítulos que integran la presente Tesis.

Sin embargo, durante la redacción del mismo se pudo comprobar que las líneas de Renfe presentaban un inconveniente importante para la implantación del sistema de tranvitrén, el ancho de vía, que, si bien no hacía imposible la aplicación de este tipo de sistemas en sus líneas, sí producía complicaciones adicionales. Como es sabido, el ancho de vía de Renfe es de 1 668 mm, frente a los anchos habituales de los sistemas de metro ligero, que son, por lo general, de 1 000 o 1 435 mm.

A pesar de que no es éste el objeto de la presente Tesis, se pueden citar, como soluciones a estos problemas, las dos siguientes (que están estudiadas en mayor profundidad en el documento citado):

- ❑ La primera solución consistía en que los sistemas de tranvitrén que se implantasen fuesen de ancho 1 668 mm, si bien esta solución tiene el inconveniente de que el área de barrido de los bogies de los vehículos de tranvitrén sería entonces mayor, y éstos tendrían menor capacidad para circular sobre curvas de radio reducido, propias del entorno urbano.
- ❑ La segunda solución consistía en que se estableciesen secciones de vía de tres o cuatro carriles sobre las líneas de Renfe que se pretendiese utilizar, de manera que se le daría servicio a los dos anchos sobre dichas líneas. Esta solución podría dar lugar a complicaciones técnicas derivadas del gran número de aparatos de vía que se deben disponer.

Ambos tipos de soluciones tienen ventajas e inconvenientes que no se van a tratar aquí, pero, como se puede ver, implican mayores complicaciones para la implantación del sistema de tranvitrén.

Dado que las líneas de FEVE son de ancho métrico, es decir, de 1 000 mm, si se plantea la implantación del sistema de tranvitrén sobre estas líneas, el problema del ancho queda reducido a la imposición de que el sistema de tranvitrén tenga ese mismo ancho, solución que, por otra parte, es habitual en España (de hecho, los tranvías de Valencia y Bilbao se han realizado en dicho ancho), a pesar de que la tendencia actual es a la utilización de ancho internacional para las explotaciones de metro ligero de nueva creación (tómense como ejemplos el metro ligero de Barcelona, Tenerife, etc.).

Sin embargo, y como se constatará a continuación, el ancho de vía no es la única motivación que hace de FEVE un caso particularmente apto para la implantación de sistemas de tranvitrén en sus líneas.

2.2. SITUACIÓN DE LAS LÍNEAS DE FEVE EN EL NORTE DE ESPAÑA

Como se constatará en el epígrafe 5 de este capítulo, los principales campos de actuación de FEVE son los servicios de viajeros (de cercanías y regionales), además de las mercancías.

Es de esperar que, al igual que ya sucede actualmente, la actividad que constituirá el negocio principal de FEVE en el futuro, y en la que deberá aspirar a una ampliación de su mercado, es la de transporte de viajeros en cercanías.

Sin embargo, la captación de pasajeros para los servicios de cercanías se ve limitada por la ubicación de las estaciones dentro de las ciudades, y por la imposibilidad, en muchas ocasiones, de llegar al destino final a bordo del tren, siendo necesario realizar un transbordo para tomar el sistema de transporte público urbano de la ciudad en cuestión, que finalmente deja al viajero en el lugar de destino. Este transbordo tiene un efecto muy negativo cuando se compara el servicio con el del vehículo privado, en el que se realiza el recorrido de puerta a puerta sin necesidad de esperas intermedias ni de cambio de modo. Este hecho es el que se ha tratado de paliar con el sistema Metrotrén (véase el epígrafe 5.3), pero a costa de fuertes inversiones en infraestructuras subterráneas, con sus elevados plazos de construcción y sus importantes costes.

Por otra parte, debido a la distancia entre las estaciones, el área de captación de viajeros en las líneas de cercanías puede ser insuficiente para llegar hasta la mayor parte de la demanda potencial en la periferia urbana, por lo que pueden existir usuarios potenciales que no contemplan la opción de las cercanías, dado que para ellos implicaría la necesidad de llegar hasta la parada del tren en vehículo privado o en otro sistema de transporte público.

Como consecuencia de todo ello, queda patente que si bien los servicios de tipo cercanías son el negocio que se apunta como futuro de FEVE, se encuentra con inconvenientes importantes, a los que se debe dar una solución para asegurar un adecuado servicio.

Por otra parte, y debido al resurgimiento de los tranvías que está teniendo lugar en los últimos años en España, existen varias ciudades en el norte de la península que están planteando el establecimiento de un sistema de este tipo. Un claro ejemplo es el caso de Bilbao, con un sistema de metro ligero de reciente creación. Otras ciudades que podrían unirse con el tiempo son Santander, Gijón, Oviedo, etc.

Los sistemas de tipo tranvía y metro ligero se presentan como opciones muy interesantes para estas ciudades de tamaño intermedio, debido, como ya se ha comentado en capítulos anteriores, a varias de sus cualidades, como son su capacidad para adaptarse al trazado viario urbano, su capacidad de adaptación a un amplio rango de demandas intermedias, su respeto al medio ambiente, etc.

Ante esta perspectiva de implantación de sistemas de metro ligero en los centros urbanos, y de necesidad de potenciación de los servicios de cercanías y de penetración desde las zonas rurales hasta los centros urbanos, se plantea el establecimiento de sistemas de tranvitrén en las líneas de FEVE.

Con ello se conseguirá ampliar los servicios de transporte público a un nivel provincial, proporcionando una entrada directa en la zona urbana, sin transbordos, que aumentará la utilización de dichos servicios, con los beneficios que ello conlleva para toda la sociedad.

Si se estudia, por ejemplo, la red de FEVE en la región asturiana, se observa que sus líneas atraviesan las zonas con mayor densidad de población, por lo que esta utilización de las líneas de FEVE para realizar servicios de cercanías mediante sistemas de tranvitrén estaría respaldada por el hecho de que las zonas a las que se les dará servicio serán aquellas en las que se producirán mayores demandas de viajes (véase la figura 4.1). Este mismo hecho se puede constatar para el caso de Cantabria, que se presenta en la figura 4.2.

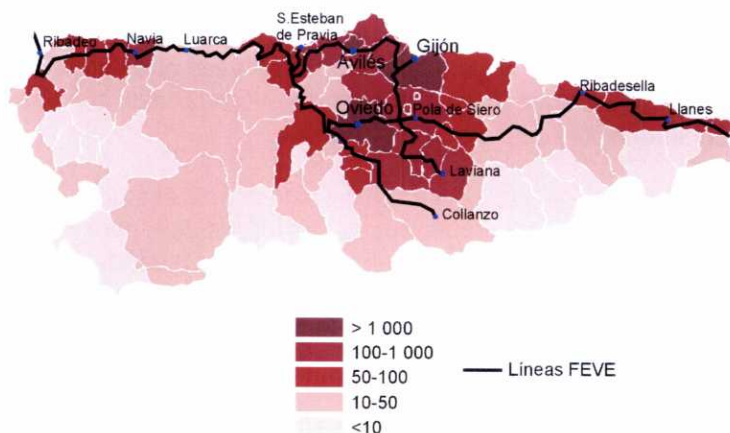


Figura 4.1: Líneas de FEVE y densidad de población por Concejos en Asturias. Fuente: elaboración propia a partir de [7].

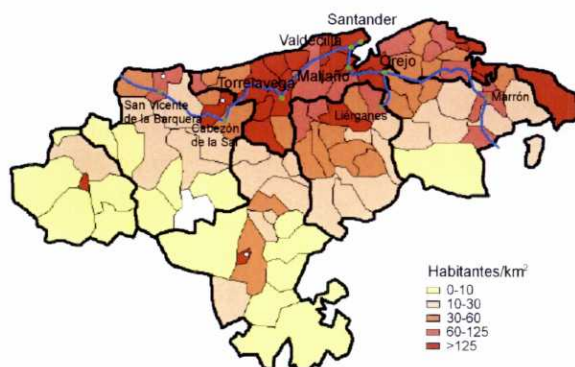


Figura 4.2: Líneas de FEVE y densidad de población por Ayuntamientos en Cantabria.

Para resolver el problema de las áreas de captación de viajeros apuntada anteriormente, se plantea la necesidad de aumentar el número de paradas en las líneas ferroviarias, de manera que las nuevas serán atendidas por los servicios de tranvitrén, potenciando la utilización de los mismos por una mayor proporción de la población.

Los servicios de tranvitrén suponen, además, para FEVE, una nueva oportunidad de ingresos, debido a que pagarán un canon por utilización de la infraestructura, sin que ello impida que FEVE siga prestando los servicios existentes hasta el momento.

3. OBJETIVOS DE LA TESIS

Los objetivos principales de la presente Tesis consisten en:

- ☐ Determinar los problemas técnicos que conllevaría la introducción de sistemas de tipo tranvitrén sobre las líneas ferroviarias convencionales de FEVE.
- ☐ Estudiar las posibles soluciones que se le pueden dar a estos problemas, y determinar, de entre todas ellas, cuáles son las más apropiadas para el caso particular de las líneas de FEVE.

La redacción de esta Tesis podría llegar a servir como base para el desarrollo de una futura reglamentación que establezca las condiciones a exigir a los sistemas de tranvitrén que se quieran implantar sobre líneas de FEVE.

- ☐ Dentro de los problemas técnicos a resolver, se estudiará con mayor profundidad el tema del perfil de rueda, al objeto de determinar un procedimiento que permita alcanzar un diseño optimizado del mismo en función de los criterios que se consideran más relevantes en relación con la dinámica de la circulación mixta sobre dos tipos de redes tan diferentes.

4. PRINCIPALES CUESTIONES TÉCNICAS A ANALIZAR

Para la consecución de los objetivos de esta Tesis, lo primero que se debe realizar es el planteamiento del problema, presentando las características técnicas de los dos sistemas que se pretende compatibilizar, y estudiando sus diferencias. Este primer paso es el que se dará a continuación, y será la base para el resto de la Tesis, ya que a partir de dichas diferencias se podrán determinar los problemas que se deberán afrontar para hacer realidad la compatibilización, paso necesario antes de estudiar las posibles soluciones que se pueden plantear, y elegir la que se considere más oportuna para el caso particular que se está tratando.

La estructura para la presentación de las características técnicas de los sistemas que se pretende compatibilizar será la misma que se utilizará más adelante para

el estudio, por bloques, de los problemas de compatibilidad y de las soluciones que se plantean. Así, se expondrán los siguientes apartados:

- ☐ Resistencia estructural de la caja
- ☐ Alimentación eléctrica del vehículo
- ☐ Sistemas de seguridad y comunicaciones
- ☐ Acceso de viajeros
- ☐ Perfil de llanta
- ☐ Gálidos
- ☐ Compatibilidad de circulaciones de distintas funcionalidades.

Se ha comentado ya que para la implantación de sistemas de tipo tranvitrén, además de la resolución de los problemas técnicos citados, será necesario resolver otras cuestiones de tipo administrativo, legislativo, económico y de operación. Estos temas, aunque de gran importancia en el desarrollo de un proyecto de este tipo, no son el objeto de esta Tesis, que se centrará, como su título indica, en los aspectos tecnológicos de la implantación del sistema de tranvitrén.

A continuación se plantearán los problemas que surgen, en relación con cada uno de los puntos mencionados más arriba, a la hora de implantar un sistema de tranvitrén sobre las líneas de FEVE. El esquema que se utiliza en este apartado es el mismo que se utilizará en el desarrollo de la Tesis.

4.1. RESISTENCIA ESTRUCTURAL DE LA CAJA

El problema de resistencia estructural de la caja, a la hora de implantar un sistema de tranvitrén, deriva de las diferentes exigencias que, en relación con este tema, deben cumplir los vehículos de metro ligero y los vehículos ferroviarios convencionales.

Estas exigencias están recogidas en las siguientes normas: por una parte, en la norma UNE-EN 12663: "Aplicaciones ferroviarias. Requisitos de dimensionamiento de las estructuras de los vehículos ferroviarios" (véase la referencia [1]), que es la traducción al español de la norma europea "Railway applications. Structural requirements of railway vehicle bodies", aprobada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) en enero de 2000, y de aplicación para los países miembros de dicho Comité; por otra parte, por la ficha UIC-651: "*Constitution des cabines de conduite des locomotives, automotrices, rames automotrices et voitures-pilotes*" (véase la referenciadesarrollada por la UIC (*Union Internationale des Chemins de Fer*) y de aplicación para las administraciones ferroviarias de todas las empresas miembros de la UIC.

La principal exigencia que se impone en dichas normas se refiere a la fuerza de compresión en la zona de topes y/o gancho, en la que se establece una resistencia mínima de 1 500 kN para los vehículos automotores de pasajeros, y de 400 kN para el caso de metros ligeros y tranvías pesados.

El hecho de que los distintos tipos de vehículos tuviesen una resistencia estructural diferente no implicaba ningún problema en el pasado, dado que cada tipo circulaba por su propia red, y nunca compartían las mismas líneas, por lo que no se podía plantear el caso de choque o alcance de un vehículo ferroviario convencional con otro de metro ligero, mucho más endeble. Sin embargo, en el momento en que se plantea el establecimiento de un sistema de tranvitrén, se inicia la discusión sobre si los vehículos de tipo metro ligero que se van a utilizar en dicha explotación deben ajustarse también a los estándares ferroviarios de resistencia estructural de la caja, dado que van a circular por líneas ferroviarias en las que compartirán el tráfico con vehículos ferroviarios convencionales que sí están obligados a su cumplimiento.

En el capítulo referente a resistencia estructural de la caja se realizará el estudio de la situación de la técnica en el momento actual en este campo, y se determinará cuál será el mejor planteamiento en el caso de querer implantar sistemas de tranvitrén sobre las líneas de FEVE.

4.2. ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

En el caso de la alimentación eléctrica del vehículo el problema que se plantea deriva de las distintas tensiones de alimentación de los sistemas de metro ligero con respecto a los ferrocarriles convencionales.

En lo que se refiere a las líneas de metro ligero, la mayoría de estas líneas se electrifican con una tensión comprendida entre los 600 y los 750 V CC, siendo la tendencia actual la de utilizar este último valor. Por ello, se supone que en el caso de querer compatibilizar un sistema de metro ligero con las líneas ferroviarias de FEVE la tensión que se encontrará en el metro ligero será de 750 V CC, dado que, en principio, se tratará de un sistema de nueva implantación o de reciente creación. Esta tensión es la que se ha utilizado en todos los sistemas de metro ligero que se han implantado en los últimos años en España, es decir, el tranvía de Valencia, el de Barcelona y el de Bilbao [5].

Por su parte, las líneas de FEVE que están electrificadas tienen una tensión de tracción de 1 500 V CC, si bien es verdad que la mayor parte de las líneas están sin electrificar.

Si se quiere establecer un sistema de tranvitrén que circule sobre vías tranviarias urbanas y sobre vías ferroviarias de FEVE habrá que solucionar el problema de la diferente tensión de alimentación en los distintos ámbitos, y también el de la no existencia de electrificación en el ámbito ferroviario, ya que, aunque en principio

las líneas más susceptibles de utilización son las más cercanas a las ciudades, que están electrificadas, no debería establecerse a priori la limitación de que los servicios de tranvitrén sólo puedan utilizar dichas líneas. En el capítulo referente al sistema de tracción se abordará este problema y las soluciones que se plantean como las más apropiadas para el caso particular que se trata de resolver en esta Tesis.

4.3. SISTEMAS DE SEGURIDAD Y COMUNICACIONES

El problema que se plantea en relación con este tema deriva del hecho de que los sistemas cuya circulación se trata de compatibilizar (metro ligero y ferrocarril convencional) suelen utilizar diferentes sistemas de seguridad y comunicaciones. Además, las características de los vehículos que utilizarán las vías compartidas son diferentes en términos de masa, velocidad, aceleración y frenado, características todas ellas que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar la señalización y los sistemas de protección de las circulaciones.

Como es sabido, la característica fundamental en el diseño de los sistemas de señalización en el ferrocarril radica en la incapacidad de los vehículos ferroviarios convencionales para realizar una parada, desde la máxima velocidad, dentro de la distancia de visibilidad de una señal. Es por ello que, en la señalización ferroviaria, se le debe dar al conductor con antelación la información sobre el estado de la vía por la que va a circular a continuación, estableciendo un sistema de conducción en “vista eléctrica”.

Por su parte, los vehículos de tipo metro ligero, debido a su menor peso y a las menores velocidades que alcanzan en sus recorridos, en la mayoría de los casos sí que podrán realizar una parada de emergencia desde la máxima velocidad permitida hasta la señal de detención dentro de la distancia de visibilidad. Por ello, en general, los vehículos de metro ligero circulan en “marcha a la vista”, es decir, el conductor dirige el vehículo en función de lo que va apareciendo en su campo de visión, sin necesidad de disponer por anticipado de información sobre el estado de la vía en los siguientes kilómetros.

En el capítulo referente a sistemas de seguridad y comunicaciones se precisarán los sistemas que se utilizan actualmente en las líneas de FEVE y en los sistemas de metro ligero existentes en España, y se establecerán las medidas más apropiadas para que, en el caso de establecer un sistema de tranvitrén sobre las líneas de FEVE, la circulación del mismo se realice de la forma más segura posible. Sin embargo, dado que los sistemas de señalización y de radio que se utilizan en cada explotación suelen ser sistemas propietarios, de diseño específico adaptado a cada caso concreto, no se entrará a definir en detalle las características que debe tener cada uno, sino que se establecerán las condiciones mínimas que se deben exigir al fabricante y a las líneas para que el sistema funcione sin aumentar los riesgos potenciales para los usuarios.

4.4. ACCESO DE VIAJEROS

A la hora de implantar un sistema de tranvitrén en una determinada ciudad, es fundamental garantizar un acceso cómodo, rápido y seguro de los usuarios a los vehículos, sea cual fuere el tipo de estación en la que se realiza dicho acceso. De esta forma se conseguirá una mayor rapidez en el ascenso/descenso del vehículo, con el consiguiente ahorro de tiempo, crucial para el sistema de tranvitrén, dado que se pretende perder el menor tiempo posible en las paradas, de forma que el tiempo total de recorrido no se vea afectado en gran medida por la existencia de las mismas.

Sin embargo, a la hora de conseguir este objetivo se plantea el problema de que el vehículo de tranvitrén utilizará dos tipos de paradas, las ubicadas en zona urbana, y las ubicadas en las líneas ferroviarias, que a priori pueden tener dimensiones totalmente diferentes en lo que se refiere a la altura y a la distancia al eje de la vía de los andenes.

Por tanto, para resolver el problema del acceso de viajeros se deberán determinar las diferencias existentes entre un tipo de paradas y otras, para conocer en detalle el problema a resolver, teniendo en cuenta el tipo de vehículo que las va a utilizar. En el capítulo referente a este tema se realizará dicho estudio, estableciendo las posibles soluciones que pueden resolver el problema del acceso de viajeros para el caso concreto de un sistema de tranvitrén utilizando las líneas de FEVE, y se tratará de determinar cuál de dichas soluciones es la más adecuada.

4.5. PERFIL DE LLANTA

El problema que se plantea en relación con el perfil de llanta deriva de las diferencias existentes entre las formas y dimensiones de los carriles y perfiles de llanta que utilizan normalmente los sistemas de metro ligero, con respecto a los de los sistemas de ferrocarril convencional (en este caso FEVE).

Estas diferencias son, principalmente, las siguientes:

- ☐ Por una parte, el diámetro de las ruedas utilizadas por los vehículos de metro ligero (con valores entre 750 y 350 mm) es, en general, menor que el utilizado en los vehículos ferroviarios convencionales (con valores en el entorno de los 800 a los 1 000 mm).
- ☐ Por otra parte, las pestañas de los vehículos de metro ligero suelen ser más estrechas y de menor profundidad que las de los vehículos ferroviarios convencionales. Este hecho se debe a la necesidad de disponer, en zona urbana, de carriles tranviarios con gargantas estrechas y no muy profundas, para no ocasionar problemas importantes a los demás usuarios de las calles (peatones, bicicletas, motos, etc.).

- ❑ Asimismo, la superestructura de los sistemas de tranvía y metro ligero suele contar con carriles de garganta, embebidos en el pavimento de la calzada, y colocados, normalmente, verticales, mientras que los sistemas ferroviarios convencionales utilizan carril de patín con una cierta inclinación (normalmente inclinación 1:20 hacia el interior en el caso de España).

Debido a estas diferencias, cuando se plantea la circulación de un vehículo de tipo metro ligero sobre vías ferroviarias convencionales, se producen ciertos problemas, que son los siguientes:

- ❑ Problemas dinámicos: Se pueden producir fenómenos dinámicos anómalos debido al diferente comportamiento de los vehículos al circular por vías con diferentes características (diferente carril e inclinación). Los fenómenos dinámicos que se produzcan pueden dar lugar a problemas de desgastes localizados, e incluso de inestabilidad para el propio vehículo, pudiendo producirse descarrilamientos, en el caso de que el cociente entre fuerzas laterales y verticales (Y/Q) que actúen en el punto de contacto sea excesivo.
- ❑ Problemas de guiado: Cuando una rueda de tipo tranviario, con pequeño diámetro y con pestaña estrecha, circula sobre los aparatos de vía de una línea ferroviaria convencional, y en particular, sobre la laguna del corazón de dichos aparatos, se pueden producir, como se verá en el capítulo correspondiente, problemas de guiado.

Estos dos tipos de problemas, claramente diferenciados e independientes, se estudiarán de forma independiente en el capítulo referente al perfil de llanta, en el que se tratará de establecer un procedimiento para alcanzar un diseño optimizado del perfil de llanta para el vehículo de tranvitrén, en función de una combinación de criterios relacionados con el desgaste del perfil, la tendencia al descarrilamiento, y las tensiones de contacto rueda-carril durante la circulación mixta sobre vías ferroviarias convencionales de FEVE y vías de tipo metro ligero.

4.6. GÁLIBO

Como es sabido, un vehículo ferroviario que vaya a circular por una determinada línea debe librar el gálibo de la Administración correspondiente. Comprobando el cumplimiento del gálibo por parte del vehículo se garantiza que no se van a producir, durante la circulación, colisiones de dicho vehículo con los elementos fijos que se disponen a lo largo de la vía, necesarios para la explotación ferroviaria (como son señales, andenes, etc.), o con otros vehículos que circulen por vías adyacentes. De esta manera el gálibo, establecido por la administración ferroviaria propietaria de la línea, limita las dimensiones de los vehículos que podrán circular por ella.

En este sentido se definen, para las comprobaciones, dos tipos de gálbos, que son los siguientes:

- ☐ Gálbo estático: es el formado por las dimensiones máximas de la sección transversal del vehículo, y sus cargas, cuando está detenido sobre la vía, en las condiciones más desfavorables [2, 6].
- ☐ Gálbo dinámico: es el gálbo que se determina considerando las oscilaciones que experimenta el vehículo en movimiento [2, 6].

En capítulo de gálbo se estudiará la inscripción, dentro del gálbo de FEVE, de los vehículos de tranvitrén que vayan a circular por sus líneas. En principio, y dado que los vehículos de tranvitrén, de tipo metro ligero, tienen, en general, dimensiones menores o como mucho iguales que las de los vehículos ferroviarios de FEVE, se podría pensar que no se van a producir problemas de gálbo al circular por las líneas de dicha administración ferroviaria. Sin embargo, como se verá en dicho capítulo, se pueden producir problemas en lo que se refiere al gálbo inferior del vehículo (sobre todo si se utilizan vehículos de tranvitrén de piso bajo), o en la zona de pantógrafos y retrovisores, por lo que se deberá prestar especial atención a este tema.

4.7. COMPATIBILIDAD DE CIRCULACIONES DE DISTINTAS FUNCIONALIDADES

Este apartado no dará lugar, en el desarrollo de la Tesis, a un capítulo diferenciado, pero se ha considerado interesante englobar bajo este epígrafe algunas características de los vehículos de tranvitrén que deben permitirles operar sin problemas tanto por su propia vía como por las vías ferroviarias convencionales. Entre ellas cabe destacar:

- ☐ El pantógrafo: debe estar diseñado de tal forma que permita la captación de la energía de tracción del tendido aéreo tanto en zona ferroviaria (si es que está electrificada) como en zona urbana.
- ☐ El enganche: debe estar diseñado de forma que sea compatible con el de las unidades ferroviarias convencionales, para permitir remolques en caso de avería. Si no se proporciona esta compatibilidad, porque no se considera oportuno que los vehículos de tranvitrén circulen formando parte de unidades mixtas con vehículos ferroviarios convencionales, ni siquiera en el caso eventual de una avería, se deben estudiar los efectos de las mismas y la forma de solventarlos.
- ☐ Señalización del vehículo: el vehículo de tranvitrén deberá tener las luces dispuestas de tal modo que sean compatibles con las regulaciones para circulación por vía ferroviaria convencional de FEVE (incluidas en el Reglamento de Señales de dicha empresa [4]), pero cumpliendo también las

necesidades que implica la circulación por zona urbana (luces de freno, intermitentes, etc.).

5. EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y SITUACIÓN ACTUAL DE LAS LÍNEAS DE ANCHO MÉTRICO EN ESPAÑA

A continuación se presenta una breve reseña histórica sobre la aparición de las líneas de ancho métrico en España y su situación actual. El objeto de este epígrafe es justificar, a la luz de la evolución que han experimentado dichas líneas, la oportunidad que supone la implantación de sistemas de tranvitrén sobre las mismas.

5.1. APARICIÓN DE LOS FERROCARRILES DE ANCHO MÉTRICO EN ESPAÑA

Los ferrocarriles de ancho métrico empiezan a construirse en España a partir del año 1870, y surgen como respuesta a los problemas de carestía que presentaban los ferrocarriles de ancho nacional, de 1 668 mm. De hecho, en la década de 1870, la técnica ferroviaria española se encontraba inmersa en la polémica de la conveniencia o no de la construcción de ferrocarriles en un ancho menor que el nacional. Entre los argumentos a favor de los ferrocarriles de ancho métrico se señalaba, como preponderante, el hecho de que podían adaptarse mejor al terreno, de tal manera que los costes de construcción se reducían considerablemente en comparación con los de los ferrocarriles de vía ancha [9].

La gran mayoría de líneas en ancho métrico se construyeron a finales del siglo XIX y principios del XX. La mayor parte de ellas eran líneas secundarias, salvo en lo que respecta a la línea principal del litoral del Cantábrico, que se construyó en este ancho debido al alto coste que hubiera supuesto la utilización del ancho español, por las dificultades orográficas que debían superarse en su recorrido.

Gran parte de estas líneas se crearon ligadas a explotaciones mineras, industrias pesadas (principalmente siderurgia), etc., para cubrir las necesidades de transporte, tanto de materias primas como de productos elaborados, generadas por ese tipo de actividades. De hecho, en muchos casos la línea ferroviaria tenía su razón de ser en la existencia de una industria y sus consiguientes necesidades de transporte. Los servicios públicos de transporte de viajeros o mercancías sobre la línea aparecían como actividades secundarias frente a la actividad principal de la industria minera o siderúrgica. Es por ello que, a pesar de que el conjunto de todas las líneas de ancho métrico llegó a alcanzar una extensión de cerca de 5 000 km [9], no se puede hablar de una verdadera red de ferrocarriles de ancho métrico, dado que la mayoría de los elementos que la constituyen eran tramos dispersos y con frecuencia inconexos.

5.2. CREACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN DE FERROCARRILES POR EL ESTADO, Y POSTERIOR CONVERSIÓN EN FEVE

Debido a este carácter individual de cada empresa ferroviaria, orientada a ofrecer un transporte muy concreto, con el paso del tiempo muchas de ellas quebraron debido a la falta de rentabilidad del servicio que prestaban. Pero, dado que ofrecían un elemental servicio público de transporte, el Estado no podía admitir la suspensión de dichos servicios, por lo que procedió a la incautación de las instalaciones y equipos de estas empresas para acometer de forma directa la prestación de los mismos.

En un primer momento, se encarga esta función a las Divisiones de Ferrocarriles, dependientes del Ministerio de Fomento, y en el año 1926 se crea, por Decreto Ley de 3 de julio, la Explotación de Ferrocarriles por el Estado (EFE), dependiente del Ministerio de Obras Públicas [9].

Con la creación de Renfe, en 1941, los ferrocarriles de vía ancha fueron traspasados desde EFE a la nueva empresa, quedando así EFE a cargo, solamente, de los ferrocarriles de vía estrecha.

En 1965, mediante el Decreto Ley 11/1965, de 23 de septiembre, se crea la entidad Ferrocarriles de Vía Estrecha (FEVE). Esta creación se debe a la gran cantidad de empresas absorbidas por EFE, y a las necesidades de incorporación del personal procedente de las mismas, y de mayor agilidad para la toma de decisiones.

Este Decreto se ve complementado por la Ampliación de Decreto Ley 11/1972, de 29 de diciembre, por el que FEVE pasa de Entidad Estatal Autónoma a Empresa Mercantil, y por el Decreto 584/1974, de 21 de febrero, que contiene los Estatutos de FEVE.

5.3. SITUACIÓN ACTUAL DE FEVE

En la actualidad, las líneas de FEVE están ubicadas, mayoritariamente, en el norte de la Península, con dos ejes principales que van de Ferrol a Bilbao, y de Bilbao a León. A estos dos ejes se les añade la línea que une Cartagena con Los Nietos, en la provincia de Murcia (véase la figura 4.3).

En total, según datos del Informe Anual de FEVE de 2002, la empresa dispone de 1 194,1 km de línea, de los que 72,4 corresponden a vía doble, y 265,1 están electrificados [3].

En lo que se refiere al tráfico de viajeros, en el año 2002 fue de alrededor de 12,32 millones, aumentando en 64 000 las cifras del año 2001. De este tráfico, el mayor porcentaje es el que se refiere a cercanías, suponiendo los servicios regionales del orden del 3,5% del total de viajeros anuales. El mayor porcentaje de

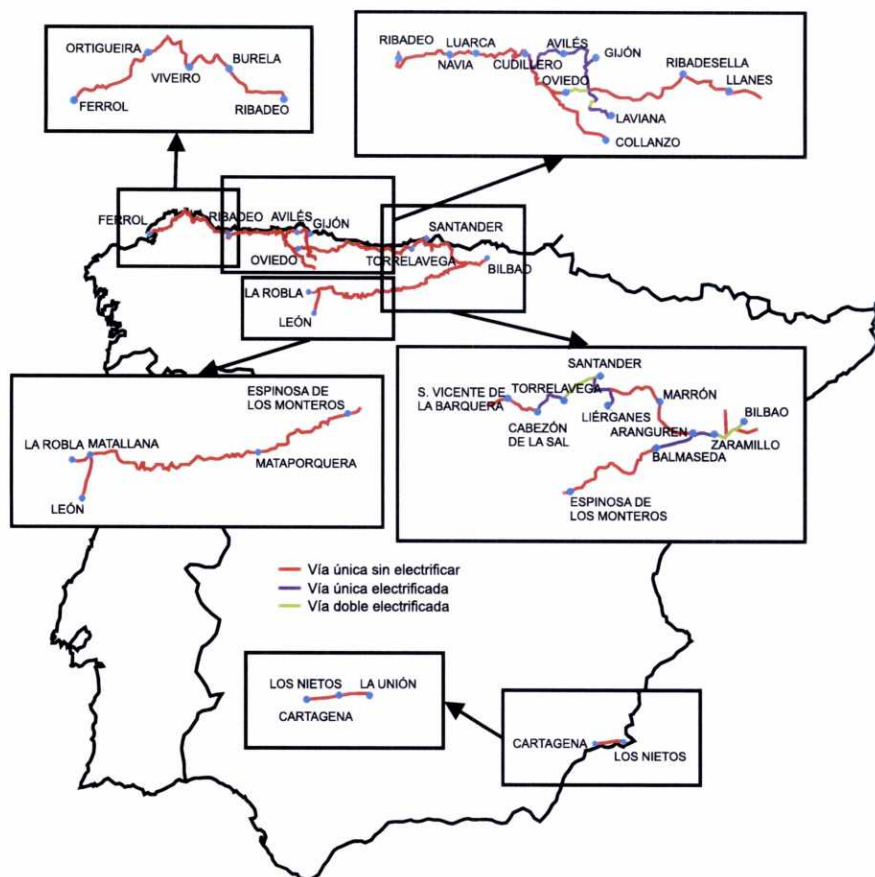


Figura 4.3: Red de FEVE en España.
Fuente: elaboración propia a partir de [3].

movimientos se produce en Cantabria y Asturias, resultado esperable, dado que es en estas zonas en las que FEVE tiene una red más densa [3].

Se debe destacar que el concepto de “cercanías” de FEVE se caracteriza por recorridos cortos, pero ni las frecuencias son tan altas como las de las cercanías de las grandes ciudades, ni el material móvil tiene una capacidad tan alta.

En la tabla 4.1 se presenta la evolución del número de viajeros de los servicios de cercanías y regionales desde el año 1996 hasta la actualidad.

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Cercanías	10 321 548	11 163 276	11 436 814	11 330 368	11 608 937	11 808 148	11 897 019
Regionales	389 235	396 610	399 318	429 476	438 009	447 837	423 372
Total	10 710 693	11 559 886	11 836 132	11 759 844	12 046 946	12 255 985	12 320 391

Tabla 4.1: Evolución de viajeros de FEVE desde 1996.

Fuente: [3].

Una de las actuaciones más importantes que se supone proporcionará a FEVE un aumento de viajeros considerable es el establecimiento de la red Metrotrén, proyecto del Ministerio de Fomento que entró en funcionamiento en noviembre del año 2000, y que consiste en la posibilidad de acceder a las redes de cercanías de Renfe y de FEVE asturianas con el mismo título de transporte. Los horarios de ambas empresas han sido coordinados para mejorar los transbordos.

En el momento actual está ya en ejecución la segunda fase de Metrotrén, que consiste en la ejecución de un túnel ferroviario en Gijón, que atravesará la ciudad desde El Humedal hasta la zona de Viesques con varias paradas intermedias. Esto proporcionará un eje longitudinal de comunicación en la ciudad. Además, se está empezando a plantear ya la solución de Metrotrén para Cantabria.

En lo que se refiere a las mercancías, en el año 2002 el tráfico fue de 479 millones de toneladas por kilómetro. Los productos más destacados entre las mercancías, en toneladas, son los carbones y derivados (59,4%) y los productos siderúrgicos (19,0%) [3].

En la tabla 4.2 se presenta la evolución de las toneladas de mercancías transportadas desde el año 1996 hasta la actualidad. Se puede observar que se ha producido una disminución del transporte de mercancías en el año 2001, volviendo a niveles similares a los que se presentaban en el año 1997.

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Toneladas	2 387 886	2 792 063	2 380 417	2 974 737	3 176 230	2 732 064	3 293 191

Tabla 4.2: Evolución de mercancías de FEVE desde 1996.
Fuente: [3].

Por otra parte, el 19 de mayo de 2003 se produjo la reapertura al tráfico de viajeros del Ferrocarril de La Robla. El tramo de Matallana a Bercedo de esta línea se había cerrado en 1991 debido al mal estado de sus infraestructuras, pero gracias a las obras realizadas por FEVE y la Junta de Castilla y León se ha conseguido que funcione de nuevo la línea completa.

REFERENCIAS

- [1] CEN (Comité Europeo de Normalización), Norma UNE-EN 12663: *Aplicaciones ferroviarias. Requisitos de dimensionamiento de las estructuras de los vehículos ferroviarios*, Madrid: Junio 2001, AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación).
- [2] DEPARTMENT OF TRANSPORT (Departamento Irlandés de Transporte), *Draft Guidelines for the Design of Railway Infrastructure and Rolling Stock*, Dublín: 2002, Department of Transport.
- [3] FEVE, *Informe anual*, Madrid: Dirección de Comunicación y Adjunta a la Presidencia de FEVE, Ediciones de los años 2000, 2001 y 2002.
- [4] FEVE, *Reglamento de Señales*, Madrid: Confederación General del Trabajo, Sindicato de FEVE.
- [5] ORDÓÑEZ, J.L., Dossier sobre tranvías: Bilbao, Barcelona, Porto, Valencia y Alicante, nuevos tranvías en marcha en la Península Ibérica, Vía Libre, mayo 2002, nº 453. ISSN: 1134-1416.
- [6] RENFE, *Instrucción Técnica de Gálbo de la Red*, Madrid: 1985, Dirección de Explotación de RENFE.
- [7] SADEI, Sociedad Asturiana de Estudios Económicos e Industriales, Datos y cifras de la economía asturiana 2001, Consejería de Hacienda del Principado de Asturias y Cajastur, 2002. ISBN: 84-7925-103-4.
- [8] UIC, Norma UCI-651: *Constitution des cabines de conduite des locomotives, automotrices, rames automotrices et voitures-pilotes*, 3ª edición, París: UIC (Union Internationale des Chemins de Fer), abril 2001.
- [9] WAIS, F., *Historia de los ferrocarriles españoles, Tomo II*, Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 3ª edición, 1987. ISBN: 2º tomo, 84-398-9877-0 / 84-398-9875-4.

Capítulo 5

RESISTENCIA

ESTRUCTURAL DE LA CAJA

I. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analiza la resistencia estructural de la caja en los dos sistemas cuya operación se pretende compatibilizar (es decir, en los vehículos ferroviarios convencionales y los de metro ligero o tranvitrén), las diferencias entre las mismas, y los problemas que dichas diferencias plantean para el establecimiento de un sistema de tipo tranvitrén.

Se debe destacar que la diferencia de resistencia estructural de un tipo de vehículo a otro no planteaba ningún inconveniente en el pasado, dado que nunca se producían circulaciones mixtas por las mismas líneas, por lo que no podía existir riesgo de colisión o alcance entre uno y otro. Ahora bien, en el momento en que se plantea el establecimiento de un sistema de tranvitrén, se inicia la discusión sobre si los vehículos de tipo metro ligero que se van a utilizar en dicha explotación deben ajustarse también a los estándares ferroviarios de resistencia estructural de la caja, dado que van a circular por líneas ferroviarias en las que compartirán el tráfico con vehículos ferroviarios convencionales que sí los cumplen.

En un primer momento se planteó la posibilidad de dotar a los vehículos de tranvitrén de una resistencia estructural similar a la de los vehículos ferroviarios convencionales, para que pudiesen circular por sus vías adaptándose a la normativa vigente. Sin embargo, el hecho de aumentar la resistencia estructural de los vehículos de metro ligero implicaría un aumento del peso total del vehículo. Este aumento de peso daría lugar, por una parte, a un aumento del coste de fabricación de los vehículos, y por otra, a un aumento de los costes de explotación. Por tanto, esta solución se descartó, dado que implicaría una pérdida de las ventajas que tiene la explotación con vehículos de tipo "ligero", como son los menores costes de explotación y de construcción, menor consumo de energía, menor desgaste de ciertos componentes y subsistemas del vehículo, la posibilidad de disponer las paradas a menores distancias, etc.

2. RESISTENCIA ESTRUCTURAL EN EL FERROCARRIL CONVENCIONAL

2.1. PLANTEAMIENTO GENERAL

Tradicionalmente en el mundo ferroviario se ha establecido un valor mínimo de resistencia estructural de la caja para permitir que un vehículo circulase por una red determinada.

La exigencia de esta resistencia estructural mínima está orientada a la consecución de una protección de los viajeros y del personal de conducción en el caso de que se produzca un choque. Una mayor exigencia de resistencia estructural al vehículo ferroviario, conlleva, en general, mayor peso del vehículo y, por tanto, mayor peso tendrá éste por viajero, lo que se traduce en un aumento de los

costes de explotación, en peores prestaciones del vehículo, y en menor espacio para los pasajeros (dado que la estructura del vehículo, mayor cuanto más resistente deba ser éste, ocupa un espacio que, de otra manera, se dedicaría a los pasajeros).

Este planteamiento de exigencia de una resistencia estructural mínima a los vehículos ferroviarios para que puedan circular por una determinada vía es muy diferente al de la industria de fabricación de automóviles. Mientras que las regulaciones ferroviarias tienden a favorecer estructuras rígidas, tipo “blindado”, los coches han sido perfeccionados con el paso de los años, convirtiéndose en habitáculos de pasajeros muy rígidos protegidos por zonas de absorción de energía en el frente y en la parte posterior, ofreciendo características de protección frente a los choques (manteniendo un espacio de supervivencia para los ocupantes) más que rigidez (es decir, más que capacidad para mantener la caja indeformable en el caso de que se produzca el choque). El tráfico mixto en las carreteras públicas de camiones rígidos y pesados con automóviles ligeros y “vulnerables”, e incluso bicicletas y peatones, se ha venido considerando aceptable.

Los principales objetivos que se trata de conseguir en el diseño de los vehículos ferroviarios, en lo que se refiere a la resistencia estructural y a la protección de los pasajeros, son los siguientes:

- ☐ Mantener un volumen mínimo de supervivencia para el personal y para los pasajeros, que resista una deformación estructural extrema.
- ☐ Protección contra la penetración de piezas o de objetos procedentes del choque en los compartimentos ocupados.
- ☐ Protección contra la expulsión de los ocupantes fuera de sus compartimentos.
- ☐ Protección de los ocupantes contra impactos secundarios en el interior del compartimento.

La consecución de estos objetivos se puede obtener mediante las siguientes estrategias:

- ☐ Se debe conseguir que los espacios ocupados sean suficientemente resistentes como para que no se produzca el colapso en caso de que haya un impacto.
- ☐ Además, el diseño de los habitáculos debe ser tal, que se reduzca el riesgo de daños a los pasajeros por golpes contra elementos del mismo.
- ☐ Por otra parte, la deceleración inicial de los ocupantes debe estar limitada, de manera que no sean lanzados contra el interior del vehículo de forma muy violenta.

Para ello, los espacios del vehículo que no vayan a estar ocupados por personas se diseñan de tal forma que su resistencia estructural sea menor que la de los espacios ocupados con frecuencia. De esta forma, en caso de colisión, estos espacios se deformarán antes que los espacios ocupados, permitiendo una deceleración inicial menor de las zonas más ocupadas, y evitando o minimizando la deformación no controlada de dichos espacios. Éstos funcionan así como fusibles mecánicos, colapsando para transformar la energía cinética de la composición y evitando así el colapso de estructuras más rígidas, como el habitáculo de pasajeros o la cabina de conducción.

Gracias a esta deceleración inicial menor de las zonas más ocupadas, los pasajeros se verán lanzados contra una superficie interior del vehículo con menos fuerza, lo que resultará en menor número de daños y menos severos. Una vez que se encuentren en contacto con la superficie interior contra la que han sido lanzados, los ocupantes pueden soportar deceleraciones mucho mayores sin que se produzcan daños mayores. Además, al sacrificar los espacios poco ocupados, se producirán menores deformaciones en las zonas con mayor ocupación.

2.2. NORMATIVA

Como muestra de la tendencia que se comenta en el apartado anterior, existen en la actualidad diversas normas que regulan la resistencia estructural mínima que deben tener los vehículos automotores que pretendan circular por vías ferroviarias convencionales.

Entre ellas destaca la norma UNE-EN 12663: “Aplicaciones ferroviarias. Requisitos de dimensionamiento de las estructuras de los vehículos ferroviarios” (véase la referencia [2]), que es la traducción al español de la norma europea “Railway applications. Structural requirements of railway vehicle bodies”, aprobada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) en enero de 2000, y de aplicación para los países miembros de dicho Comité.

En dicha norma se establece, para los vehículos automotores de tráfico de viajeros (categoría P-II) que vayan a circular por las líneas ferroviarias convencionales, una resistencia a la compresión en la zona de topes y/o gancho de 1 500 kN (igual al valor exigido por la UIC). Este valor coincide con el que ya establecía la ficha UIC-651: “*Constitution des cabines de conduite des locomotives, automotrices, rames automotrices et voitures-pilotes*” (véase la referencia [18]), desarrollada por la UIC (*Union Internationale des Chemins de Fer*) y de aplicación para las administraciones ferroviarias de todas las empresas miembros de la UIC. En dicha ficha se establecía que, para garantizar la seguridad del personal, las deformaciones que se produzcan en caso de choque deben darse en la zona delantera o por debajo de la cabina, recomendando la capacidad de absorber sin deformación permanente un esfuerzo de compresión de 1 500 kN aplicado sobre los topes del vehículo.

Por otra parte, la norma UNE establece ciertos requisitos adicionales, como puede ser la resistencia a una fuerza de compresión de 500 kN, aplicada en diagonal a nivel de los topes, en el caso de que existan topes laterales. Esta ya no sería de aplicación para el caso del tranvitrén, dado que los vehículos de tipo metro ligero disponen de un aparato central de enganche automático, y no de dos topes laterales, típicos de los vehículos ferroviarios convencionales [2].

2.3. PROYECTO SAFETRAIN

Con respecto al tema de la normativa europea de resistencia estructural de la caja, se debe señalar el hecho de que en el período que va desde agosto de 1997 hasta julio de 2001, se desarrolló, a nivel europeo, el proyecto SAFETRAIN, cuyo objetivo principal era la reducción del número de víctimas mortales y de heridos en accidentes ferroviarios, por medio de mejoras en el diseño de la estructura de los vehículos ferroviarios.

La principal aportación del proyecto SAFETRAIN consistía en el desarrollo de una tecnología apropiada para disipar la energía del choque y diseñar unas estructuras de impacto específicas que se deformen de una manera controlada y progresiva para absorber dicha energía.

Actualmente se pretende aprovechar las conclusiones obtenidas en el proyecto SAFETRAIN como base para la realización de una nueva normativa europea referente a resistencia estructural de los vehículos ferroviarios, por lo que es posible que, en un futuro cercano, las condiciones que se han puesto de manifiesto en el apartado anterior se vean modificadas en función de dichas conclusiones.

3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL TRANVIARIA

Por su parte, los vehículos de metro ligero o tranviarios convencionales tienen una resistencia estructural mucho menor, debido a que su estructura es más ligera, y por tanto, más endeble. Este hecho se debe a que, como ya se ha comentado, la exigencia de resistencia estructural se traduce en un aumento del peso del vehículo, por lo que si se pretendiera exigir lo mismo al vehículo ligero que a un vehículo ferroviario convencional, aquél perdería su característica de “ligereza” y las ventajas ligadas a ella.

La norma UNE-EN 12663 establece para los vehículos tranviarios (categoría P-V) una resistencia estructural de 200 kN, mientras que para los vehículos de metro ligero y tranvías pesados (categoría P-IV) este valor se eleva a 400 kN [2].

En la tabla 5.1 se presenta un resumen de todos los requisitos relacionados con la resistencia estructural, recogidos en la norma UNE, que son de aplicación a los automotores destinados al transporte de pasajeros y a los vehículos de metro ligero y tranvía pesado.

Tipo de solicitud	Valor exigido a automotores pasajeros (kN)	Valor exigido a metros ligeros y tranvías pesados (kN)
Fuerza de compresión en la zona de topes y/o gancho	1 500	400
Fuerza de compresión por debajo de la zona de topes y/o gancho	-	-
Fuerza de compresión aplicada en diagonal a nivel de los topes (si están instalados los topes laterales)	500	-
Fuerza de tracción a nivel del gancho	1 000	Acuerdo diseñador-explotador
Fuerza de compresión 150 mm por encima del suelo de la estructura, en el cabecero	400	-
Fuerza de compresión a nivel medio (parte baja de la ventana)	300	-
Fuerza de compresión a nivel del batiente del techo	300	-

Tabla 5.1: Requisitos de la norma UNE relativos a resistencia estructural.

Fuente: [2].

Sin embargo, es importante destacar que hasta 2001 no existía ninguna regulación a nivel europeo sobre la resistencia estructural de la caja de los vehículos tranviarios. Este hecho se puede deber a que, hasta hace muy poco tiempo, la mayoría de los sistemas tranviarios eran cerrados, es decir, que se diseñaban los vehículos para un determinado sistema, de forma que ese vehículo sólo circularía por el sistema para el que había sido diseñado. Así, los vehículos solían tener características uniformes en lo que se refería a la resistencia estructural dentro de cada explotación.

En la actualidad está cambiando la tendencia, de manera que las empresas fabricantes de material móvil ofrecen modelos estandarizados de vehículos, por lo general modulares, que se adaptan a las necesidades de los compradores por medio de distintas combinaciones de sus módulos. De esta forma se consigue abaratar los costes de producción, gracias a la economía de escala a la que dan lugar las producciones en series más grandes. Este hecho hace que sea necesario establecer unas condiciones mínimas para estos modelos tipo, en diferentes ámbitos entre los que se encuentra la resistencia estructural, motivo por el que han surgido las exigencias a las que se ha hecho referencia más arriba.

A pesar de todo, es importante tener en cuenta que, debido a que este tipo de vehículos circulan por la calle, compartiendo el tráfico con los vehículos rodados, hace que sea complicado imponer a estos vehículos una resistencia estructural elevada, que además de ser innecesaria, podría suponer un riesgo para los demás usuarios de las calles.

4. RESISTENCIA ESTRUCTURAL EN LOS VEHÍCULOS DE TRANVITRÉN

4.1. INTRODUCCIÓN

De lo expuesto hasta el momento se deduce que el tema de la resistencia estructural de los vehículos de tranvitrén será uno de los aspectos técnicos que se deberá resolver a la hora de integrar las circulaciones de éstos vehículos con los ferroviarios convencionales sobre las líneas de FEVE.

Para obtener una visión clara de este tema se estudiarán, en este punto, las soluciones adoptadas en los países europeos que han implantado sistemas de tranvitrén, y las conclusiones que se pueden extraer de dichas aplicaciones.

4.2. SOLUCIÓN ADOPTADA EN OTROS PAÍSES

4.2.1. Alemania

En Alemania, la cuestión de la seguridad se ha abordado mediante el establecimiento de normas específicas para la utilización de líneas ferroviarias por cualquier tipo de vehículo ferroviario que no cumpla los requisitos de resistencia estructural de los vehículos ferroviarios convencionales.

Estas normas están contenidas en las "Recomendaciones de la VDV (*Verband Deutscher Verkehrsunternehmen*, Asociación de Empresas de Transporte Alemanas) para la operación de vehículos ferroviarios urbanos en explotación mixta conforme a BOStrab (*Verordnung über den Bau und Betrieb der Strassenbahnen – Strassenbahn-Bau-und-Betriebsordnung*, BOStrab –, Reglamentaciones alemanas sobre la construcción y explotación de tranvías) y a EBO (*Eisenbahn-Bau-und-Betriebsordnung*, Reglamentaciones alemanas para la construcción y explotación de ferrocarriles)" (véase la referencia [1]).

A su vez, estas recomendaciones se basan en los documentos: 70404/92, del Ministerio Alemán de Tráfico, llamado "Informe pericial sobre la puesta en servicio de automotores ligeros para servicios metropolitanos (LNT) en explotación mixta con vehículos EBO sobre vías de ferrocarril convencional - Resumen -" [16], y 70547/94 del Ministerio Alemán de Tráfico, titulado "Informe pericial complementario sobre la puesta en servicio de automotores ligeros para servicios metropolitanos (LNT) en explotación mixta con vehículos EBO sobre vías de ferrocarril convencional - Informe final -" [17], que es una ampliación y mejora del documento anterior.

En dichos documentos se definen las condiciones que se han de cumplir en la infraestructura para que los vehículos de tranvitrén puedan circular de forma segura por ella, en función de la velocidad de la línea. Estas condiciones se han

establecido en base a la probabilidad de una colisión y a una comparación de las víctimas probables en caso de que ésta se produzca.

El resumen de las condiciones impuestas se presenta en la tabla 5.2.

Vías secundarias			Vías principales					
Hasta 50 km/h	Hasta 80 km/h	Más de 80 km/h	Hasta 80 km/h	Hasta 90 km/h	Hasta 100 km/h	Hasta 120 km/h	Hasta 160 km/h	Más de 160 km/h
Existe sistema de señalización, desvíos señalizados, conducción automática de trenes, dispositivos de protección por ocupación de vía, secuencia de trenes técnicamente segura, radio tren-tierra			Prohibición de hacer maniobras con vehículos tipo tren en las vías ocupadas por tranvitrén					
			Existen dispositivos de aviso de vía libre en las estaciones para vías con circulación mixta					
			Supervisión especial del funcionamiento					
			Señalización circulaciones a contravía		Seguridad técnica de circulaciones a contravía (funcionamiento de cambio de vía)		No se permite si hay túneles en la línea	

Tabla 5.2: Condiciones de circulación por líneas ferroviarias para el tranvitrén alemán. Fuente: [11, 16, 17].

Estas condiciones están orientadas a garantizar, cuando se circula en vehículos de tipo tranvitrén, el mismo nivel de seguridad que circulando en vehículos ferroviarios convencionales.

Por otra parte, en Alemania se está desarrollando la norma DIN 5560: "*Längsfestigkeit der Fahrzeugkästen von Leichttriebwagen*", todavía en estado de borrador, que regulará el proceso de homologación de los vehículos de tranvitrén para circular por las vías ferroviarias convencionales.

4.2.2. Inglaterra

British Rail Research estudió si sería posible construir vehículos de metro ligero que cumpliesen con las normas ferroviarias de resistencia al choque, pero determinó que esta opción no es práctica, debido, sobre todo, a los siguientes factores:

- ❑ Necesidad de que el conductor tenga una buena visibilidad del tráfico de la calle a su alrededor, lo que conlleva la necesidad de que el diseño de las cabinas sea abierto, con amplios ventanales que reducen la posibilidad de garantizar una resistencia estructural muy elevada.
- ❑ Necesidad de mayor capacidad de aceleración, lo que hace necesario reducir el peso del vehículo.
- ❑ Modificación en la altura del piso de los vehículos de metro ligero, debido a la tendencia al piso bajo, con la disposición de los dispositivos de tracción

y choque a distinta altura que en los vehículos ferroviarios convencionales, lo que hace difícil garantizar una resistencia a la compresión a esa altura.

- ❑ Diferencias en las dimensiones de los vehículos de metro ligero respecto a los vehículos ferroviarios convencionales.

Por su parte, la normativa británica referente a los sistemas de tranvitrén, que se concreta en los documentos GM/RT-2452 [12] y GE/GN-8502 [13], establece que se permite una resistencia al choque menor, siempre que se compense con un sistema de señalización que proporcione un alto grado de protección contra las colisiones entre los vehículos ferroviarios ligeros y convencionales. Para ello recomienda la provisión de medidas de protección contra el paso de señales en posición de peligro mediante la aplicación automática de los frenos en caso de que se de esa circunstancia.

4.2.3. Francia

En el caso francés, se aceptó que los vehículos de tranvitrén no podían cumplir la resistencia estructural de la caja exigida a los vehículos ferroviarios convencionales, y la DTT (*Direction des Transports Terrestres*) decidió establecer un estudio estándar para determinar el grado de seguridad de los sistemas tranvitrén, comparándolo con la situación preliminar. Este estudio, llamado G.A.M.E. (*Globalement Au Moins Equivalent*), consiste en comparar el riesgo que se asume cuando se circula por una red de tranvitrén con el que se asumiría si se realizase el mismo trayecto con la combinación ferrocarril convencional más tranvía correspondiente. Si el cociente entre ambos riesgos es menor que 1 quiere decir que el sistema de tranvitrén mejora las condiciones de seguridad respecto a la situación de partida.

4.3. CONCLUSIONES DE LAS SOLUCIONES INTERNACIONALES

En general, en las explotaciones existentes hasta el momento actual, se ha aceptado que no es realista esperar que los vehículos de tranvitrén cumplan los requisitos normales de resistencia al choque para material móvil ferroviario convencional. Las razones principales que llevan a esta conclusión son las siguientes:

- ❑ El vehículo de tranvitrén, al estar ideado como un vehículo de explotación mixta, deberá ser más ligero que los vehículos ferroviarios convencionales, ya que está concebido para dar un servicio con menores distancias entre paradas, por lo que son necesarias prestaciones de aceleración y frenado mejores que en un vehículo ferroviario convencional, y estas sólo se pueden alcanzar limitando el peso del vehículo.
- ❑ Además, un vehículo de metro ligero tiene menores costes de explotación, debido, por una parte, al menor peso del vehículo, y, por otra, al hecho de que, dado que las unidades de metro ligero tienen menor capacidad, éstos

tienen mayores posibilidades de adaptación a las variaciones de la demanda (de las horas punta a las horas valle), mediante la utilización de vehículos ligeros formados por varias unidades.

- ☐ Si el vehículo es de piso bajo, o la altura del enganche es reducida, la resistencia estructural a la altura de los enganches de los vehículos ferroviarios convencionales se ve muy penalizada.

Por ello, el problema se resuelve desde un punto de vista de valoración del riesgo, de forma que los proyectos que implican la circulación mixta de vehículos ligeros con vehículos ferroviarios convencionales deber ser diseñados, explotados y administrados de tal manera que el riesgo para un pasajero que utilice estos servicios no sea mayor que el que asumiría si recorriese el trayecto con una combinación de tren más tranvía.

4.4. PROYECTO SAFETRAM

4.4.1. Objetivos del proyecto SAFETRAM

Al igual que en el caso de los vehículos ferroviarios convencionales se ha estudiado su resistencia estructural en el proyecto europeo SAFETRAIN, para el caso de los vehículos tranviarios y de tranvitrén se está desarrollando en la actualidad el proyecto SAFETRAM, cuya fecha de comienzo fue julio de 2001, y cuya finalización está prevista para julio de 2004. El objetivo de este proyecto es recabar la información necesaria para el desarrollo de un nuevo estándar relativo a resistencia estructural de la caja de los vehículos tranviarios y de tranvitrén (o de tranvía periurbano o metropolitano, como lo llaman en dicho proyecto).

Uno de los principales objetivos de este proyecto consiste en optimizar la estructura de la caja de los vehículos de tranvitrén de tal manera que se obtenga un nivel de seguridad mejorado para los ocupantes del vehículo, manteniendo unos costes de construcción y unos pesos aceptables.

Para ello, se tiene en cuenta el hecho de que los pasajeros pueden resultar heridos o muertos debido a las siguientes causas:

- ☐ Debido al choque principal que da lugar, o bien a que el compartimento de pasajeros se deforme, y consecuentemente se reduzca el espacio de supervivencia, o bien por la penetración en el compartimento de partes del vehículo u objeto contra el que se choca.
- ☐ Debido a choques secundarios entre el ocupante y el interior del vehículo (superficies interiores del compartimento, otros ocupantes u objetos sueltos) en algún momento después de la iniciación del choque principal.

Para cumplir con sus objetivos, SAFETRAM establecerá los siguientes requisitos:

- ☐ Requisitos técnicos orientados a la disipación de la energía del choque, designando en el vehículo unas zonas de impacto específicas (en los extremos) que se deben deformar de una manera controlada y predecible.
- ☐ Mejorar las posibilidades de supervivencia de los ocupantes manteniendo dentro de unos límites los niveles de deceleración sufridos.

4.4.2. Situaciones de colisión

La primera parte del proyecto SAFETRAM ha consistido en el estudio estadístico de los accidentes y víctimas que se han producido en 21 operadores de sistemas tranviarios, al objeto de determinar las situaciones de colisión más importantes y evaluar sus consecuencias. En lo que se refiere a los sistemas de tranvitrén, dado que las experiencias en servicio son relativamente recientes y poco numerosas, el análisis se refirió a los accidentes en tráficos ferroviarios regionales, en el marco del ERRI B205.

Las situaciones de colisión que se consideraron relevantes para el tranvitrén se presentan en la tabla 5.3. Son estos tipos de colisiones a los que se orientará el trabajo de SAFETRAM, al objeto de mejorar la respuesta de la estructura del vehículo ante este tipo de eventos.

Código	Escenario	Velocidad (km/h)	Energía (MJ)
P1	Tranvitrén contra camión	40	0,78
P2	Tranvitrén contra vagón de 80 t	25	0,79
P3	Tranvitrén contra tren de 129 t	22	0,78
P4	Tranvitrén contra tranvitrén	36	1,31

Tabla 5.3: Situaciones de colisión relevantes para el tranvitrén.

Fuente: [9]

4.4.3. Requisitos de diseño

Los requisitos de diseño que se han establecido para el caso del tranvitrén son los siguientes [9]:

- ☐ Prevención del cabalgamiento: los topes deben estar provistos con dispositivos anticabalgamiento con capacidad para soportar una fuerza vertical de 150 kN. El diseño debe estar probado para una excentricidad de hasta 50 mm.

Como ejemplo de dispositivo anticabalgamiento se presenta, en la figura 5.1, el del tranvía de Messina (en Sicilia), en color gris.

- ❑ **Prevención de la intrusión en caso de choque:** el riesgo de intrusión de ciertos elementos en el compartimento de pasajeros (con el consiguiente problema de seguridad para los mismos) se limita mediante la simulación de las situaciones de riesgo. En lo que se refiere a los elementos interiores (asientos, barras de sujeción, pantallas informativas, etc.), se comprueba la resistencia de sus uniones para los niveles de deceleración que se producen durante las situaciones de colisión de referencia.



Figura 5.1: Tranvía de Messina (Sicilia) con dispositivo anticabalgamiento. Fuente: [20].

- ❑ **Absorción de energía:** el vehículo debe absorber la energía correspondiente a cada situación de colisión relevante de una manera controlada. Este objetivo se debe cumplir de tal forma que el colapso estructural está confinado a ciertas áreas determinadas de la estructura, preservando la mayor parte del espacio de viajeros y del conductor. La resistencia estática longitudinal del tranvitrén debe ser igual a 600 kN, obteniéndose una fuerza máxima de aplastamiento de 1 500 kN.
- ❑ **Prevención de deceleraciones elevadas:** el vehículo debe limitar la deceleración global con efecto de colisiones secundarias. Los niveles máximos de deceleración son generalmente menores que 3g, para cada situación de colisión, aunque el diseño respetará normalmente el criterio de deceleración de 5g.
- ❑ **Prevención del descarrilamiento:** se debe evitar el desprendimiento de piezas estructurales o de equipamiento para limitar el riesgo de descarrilamientos. Las consecuencias de golpear un obstáculo en la vía deben ser minimizadas asegurando que ningún obstáculo es capaz de penetrar bajo el vehículo (las uniones entre la caja y los bogies deben permanecer intactas). Los vehículos de tranvitrén no necesitarán un deflector clásico ferroviario siempre que la altura del bastidor sobre la cabeza del carril sea suficientemente baja. Sin embargo, se debe diseñar el frontal del vehículo en su zona inferior para que funcione como deflector de pequeños obstáculos.
- ❑ **Visibilidad del conductor:** cualquier obstáculo con una altura de 1,2 m sobre el nivel del carril, y a una distancia de 0,3 m al frente del vehículo debe ser visible para el conductor. La visibilidad depende de la posición del asiento

y del pupitre del conductor, de la altura del suelo de la cabina, y de la altura del morro. Para un conductor de tamaño medio, asumiendo que también son medias las posiciones longitudinales y verticales del asiento, la visibilidad del conductor está limitada por la forma del pupitre.

- ❑ Espacio de supervivencia tras la deformación: el vehículo deberá preservar el espacio de supervivencia en caso de deformación por colisión y prevenir las intrusiones. En el proyecto SAFETRAM se han elegido los siguientes criterios: o bien la distancia entre el pupitre del conductor y el asiento del conductor es, como mínimo, de 300 mm, o bien la distancia entre el pupitre del conductor y la pared trasera de la cabina no es menor de 750 mm (véase la figura 5.2).

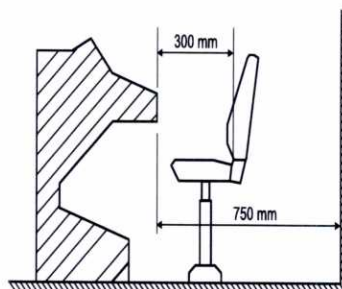


Figura 5.2: Supervivencia del conductor. Fuente: [9].

- ❑ Disposición del enganche: la disposición del enganche no debe contribuir a la absorción de energía, pero el diseño debe garantizar que el enganche no impide el correcto funcionamiento de los elementos de absorción de energía (aunque en otros proyectos se puede plantear que los enganches contribuyan a dicha absorción). En caso de impacto contra un tren con enganche central, se debe atrapar el enganche para asegurar la absorción de energía y para prevenir la intrusión.
- ❑ Además, y para el caso de que, a pesar de la mejora de la seguridad activa, se produzca una colisión, se debe garantizar la compatibilidad con los toques de los vagones de mercancías. Para ello, los vehículos ferroviarios ligeros deben tener unas zonas de choque que sean capaces de resistir los esfuerzos normales a la altura de la fuerza de compresión longitudinal, así como cualquier momento de impacto que se produzca debido a las tolerancias de operación. Por tanto, el bastidor de los vehículos ferroviarios ligeros se debe elevar hasta la altura de bastidor de los vehículos convencionales de la línea principal. Los vehículos de piso bajo deben incorporar también una estructura para asimilar y distribuir las fuerzas ejercidas sobre ellos en el choque.

El hecho de que los vehículos ferroviarios ligeros deban tener la misma altura de bastidor que los vehículos ferroviarios convencionales no significa que deban tener topes laterales, sino que se pueden crear superficies alternativas en el morro del vehículo que sean capaces de absorber las fuerzas ejercidas por los topes del otro vehículo implicado en el choque (véase la figura 5.3). En cualquier caso, se recuerda que el enganche normalizado de FEVE es el central de tipo Allison.

- Igualmente, se deberá garantizar la compatibilidad para el caso de choques con los demás tipos de vehículos posibles (es decir, además del ferrocarril convencional, otro tranvía o un vehículo de carretera). En la figura 5.4 se presentan las diferentes alturas de impacto correspondientes a cada situación de colisión de referencia (vagón con topes laterales, tren con enganche central, tranvitrén y camión).

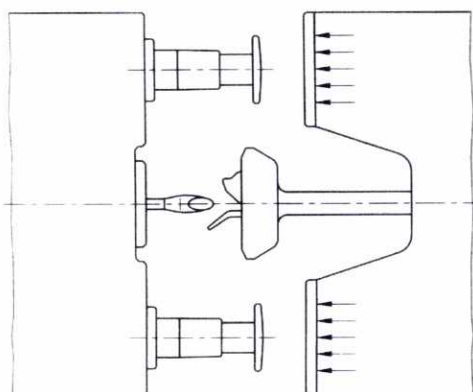


Figura 5.3: Disposición de superficies alternativas para compatibilidad de topes. Fuente: [7].

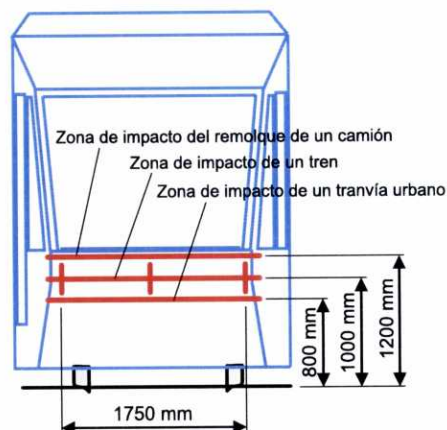


Figura 5.4: Alturas de impacto de cada situación de colisión. Fuente: [9].

Es importante señalar que estos requisitos son provisionales, dado que en el momento actual todavía no se ha llegado a la fase final del proyecto SAFETRAM, y existen aún ciertos parámetros que han de ser ajustados para cumplir los objetivos en todas las situaciones de colisión.

5. RECOMENDACIONES PARA EL CASO FEVE

5.1. EL BINOMIO SEGURIDAD ACTIVA – SEGURIDAD PASIVA

Los sistemas de protección al pasajero en los servicios ferroviarios se basan en dos enfoques de seguridad distintos, el de la seguridad activa y el de la seguridad pasiva, que son, en cierto modo, contrapuestos, aunque se complementan. Su definición podría ser la siguiente:

- Seguridad activa: se refiere al conjunto de sistemas que se implementan en el material móvil y/o en la infraestructura para evitar que se produzcan colisiones entre los distintos vehículos que pueden circular por una vía determinada (por ejemplo: sistemas de señalización, de protección automática del tren, de tracción y frenado, etc.).
- Seguridad pasiva: se refiere a los sistemas que buscan evitar o reducir al mínimo los daños al pasaje y al personal en el caso de que tenga lugar una colisión. Básicamente es la capacidad del vehículo para absorber la ener-

gía de la colisión sin producir daños en el habitáculo de pasajeros y en la cabina de conducción.

Por tanto, la protección al pasajero en los servicios ferroviarios se realiza mediante una combinación de los dos conceptos anteriores, tratando de evitar los accidentes mediante la seguridad activa, y protegiendo a los viajeros mediante la seguridad pasiva en caso de que finalmente el accidente se produzca. Para que los daños a los pasajeros sean mínimos se debe conseguir una combinación adecuada entre ambos conceptos.

5.2. APLICACIÓN DEL BINOMIO SEGURIDAD ACTIVA – SEGURIDAD PASIVA AL CASO DEL TRANVITRÉN. AUMENTO DE LA SEGURIDAD ACTIVA

Dado que en todos los países europeos se ha considerado apropiado aceptar para los vehículos de tranvitrén una resistencia estructural de la caja menor que la exigida a los vehículos ferroviarios convencionales, parece lógico que ese mismo planteamiento sea adoptado en el caso español.

Este hecho implica que se asume una disminución en la seguridad pasiva exigida a los vehículos de tranvitrén. Así, si se pretende mantener el nivel de riesgo en unos valores similares a los que se presentaban en la situación previa, se deben realizar actuaciones que estén orientadas al aumento de la seguridad activa. Es decir, se debe conseguir, de alguna forma, que el riesgo de que se produzca un accidente sea menor en las circulaciones de tipo tranvitrén que en las de los vehículos ferroviarios convencionales.

En cierta medida, los vehículos de tipo metro ligero (y por tanto los de tipo tranvitrén), ya están dotados de un nivel de seguridad activa mayor que los vehículos ferroviarios convencionales, debido a las siguientes razones:

- ☐ Por una parte, a sus prestaciones de aceleración y frenado, que hacen que la distancia de frenado de estos vehículos sea más corta
- ☐ Por otra parte, a la limitada velocidad de circulación de estos vehículos (siempre por debajo de los 100 km/h).

En este sentido, y como ejemplo, cabe citar que la capacidad de deceleración de emergencia de un vehículo de tipo metro ligero es del orden de $2,75 \text{ m/s}^2$, mientras que en el caso de un vehículo ferroviario convencional se reduce al orden de $1,00 \text{ m/s}^2$ [4, 11]. Con estos datos se obtiene que la distancia de frenado desde una velocidad de 50 km/h hasta la detención del vehículo sería del orden de 96 m para el caso de un vehículo de ferrocarril convencional, reduciéndose a 35 m en el caso del vehículo de tranvitrén. Para el caso de velocidad de partida de 70 km/h tendríamos del orden de 189 m para ferrocarril convencional y 69 m para el tranvitrén. Como puede constatar, las distancias de frenado de emergencia

tienen la misma relación entre ellas que las deceleraciones máximas de emergencia (factor de 2,75).

Por tanto, a igual velocidad de circulación, la distancia de detención de emergencia del vehículo de tranvitrén siempre será mucho menor que la del vehículo ferroviario convencional, hecho que redundará en un aumento de la seguridad activa (mayor facilidad para evitar el accidente, porque el vehículo se puede detener antes de chocar con el obstáculo o con otro vehículo). A este fenómeno se le añade el hecho de que las velocidades de circulación de los vehículos ferroviarios convencionales pueden llegar a ser mucho mayores que las de los vehículos de tranvitrén, lo que hace aún mayor la distancia de frenado de emergencia, por lo que se ve claramente que la seguridad activa de los vehículos ferroviarios convencionales es mucho menor que la del tranvitrén.

Además de esta menor distancia de frenado, característica de los vehículos de tipo metro ligero, existen ciertas medidas que se pueden tomar para conseguir una potenciación de la seguridad activa, como son las que se presentan a continuación, que se pueden adoptar de forma aislada o combinando varias:

- ❑ La menor resistencia del bastidor y de la parte frontal del vehículo se compensa gracias a la mejor relación peso-freno de los vehículos ligeros. Garantizando un mayor parámetro peso-freno, se conseguirá una deceleración de emergencia mayor, obteniéndose, como se ha comentado anteriormente, una reducción importante de la longitud recorrida desde la aplicación de los frenos hasta la detención total del vehículo, lo que reduce sensiblemente la probabilidad de que se produzca un accidente porque al conductor no le da tiempo a frenar.
- ❑ Para evitar el riesgo de que se produzcan colisiones entre vehículos ferroviarios ligeros y convencionales, motivadas por el rebase de una señal en posición restrictiva, se pueden establecer medidas de protección contra el rebase de señales en dicha posición, cuyo funcionamiento consiste en que todos los vehículos ferroviarios (tanto ligeros como convencionales) paran ante una señal en posición restrictiva (o dentro de su zona de seguridad) por medio de la aplicación automática de los frenos.
- ❑ En la misma línea que el párrafo anterior, se puede establecer un sistema de protección automática de trenes (ATP, *Automatic Train Protection*), de manera que se controla la velocidad máxima con la que puede circular el vehículo por cada punto del recorrido, en función de la carga que lleva en cada momento, de las características de la vía, etc. De este modo, si en algún momento el vehículo circula a una velocidad mayor de la adecuada, el sistema de protección aplica automáticamente los frenos. Esto mismo ocurre cuando el conductor se salta una señal en posición de peligro.
- ❑ Disposición de un sistema de radio del tipo tren-tierra, que permita al centro de control ponerse en contacto con cualquier vehículo que circule por

las líneas en un momento determinado, pudiendo darse avisos de situación de peligro, de obstáculos en la línea, etc.

5.3. METODOLOGÍA DE COMPARACIÓN DE RIESGO

Para el caso de FEVE se recomienda aplicar una metodología de comparación de riesgos, similar a las que se han realizado en Alemania y Francia, de tal manera que se garantice que el riesgo al que está sometido un pasajero que utiliza los servicios de tranvitrén sea al menos igual, y a poder ser menor, que el que asumiría en caso de realizar el mismo trayecto mediante los servicios combinados de ferrocarril convencional más tranvía.

En el anejo 1 se expone dicha metodología de comparación de riesgo, si bien no se realiza la comparación, por ser necesarios datos a los que no se ha tenido acceso en esta Tesis. En el momento en que se pretenda implantar un sistema de tranvitrén será necesario acometer este tipo de estudio.

5.4. CONCLUSIONES DE APLICACIÓN EN EL CASO FEVE

Para el caso de que se trata en esta Tesis, es decir, de compatibilización de un sistema de metro ligero con el ferrocarril convencional de FEVE, se recomienda la adopción del mismo planteamiento que el utilizado en el resto de las explotaciones europeas. Es decir, que se aceptará la circulación de vehículos de tranvitrén con una resistencia estática longitudinal de 600 kN sobre las líneas ferroviarias de FEVE.

La menor resistencia estructural del bastidor y de la parte frontal quedará compensada gracias al hecho de que la energía cinética a disipar en el frenado de los vehículos ligeros es menor, debido a su menor peso y a la menor velocidad de circulación. De este modo, en conjunto la seguridad no queda reducida.

Sin embargo, esta aceptación estará supeditada a la adopción de las medidas necesarias para conseguir un aumento de la seguridad activa, de tal manera que el riesgo global del sistema de tranvitrén no sea mayor que el de la combinación de ferrocarril convencional más tranvía. Estas medidas podrán ser una o varias de las citadas en el apartado 5.2, así como otras que pueda presentar la empresa responsable y que muestren su efectividad a tal efecto. Una de las medidas que se citaba era la implantación de sistemas que realizan una aplicación automática de los frenos en caso de que el vehículo se salte una señal en posición restrictiva. Uno de los sistemas de este tipo es el ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático), que, como se comenta en el capítulo correspondiente a sistemas de seguridad y comunicaciones, está implementado en ciertas líneas de la red de FEVE. Como se ha puesto de manifiesto en dicho capítulo, se considerará como paso previo imprescindible al establecimiento de un sistema de tranvitrén en una determinada línea de FEVE, la dotación de la misma con el sistema ASFA.

En general se puede decir que se aceptará una reducida resistencia al choque, siempre que esta se compense con el uso de un sistema de señalización que proporcione un alto grado de protección contra las colisiones entre los vehículos ferroviarios ligeros y convencionales.

Para garantizar que las medidas de potenciación de la seguridad activa compensan en suficiente grado la menor resistencia estructural de la caja de los vehículos de tranvitrén, se recomienda la realización de un estudio de comparación de riesgo, siguiendo un procedimiento similar al especificado en el anejo 1.

Además, se deberá garantizar la compatibilidad de topes con los vehículos ferroviarios convencionales, elevando la altura del bastidor de los vehículos de tranvitrén, con respecto a los vehículos tranviarios convencionales, hasta 780 mm sobre la cabeza del carril (que es la altura del eje de los topes de los vehículos ferroviarios de FEVE). Sin embargo, no será necesaria la disposición de un tope a esta altura, como se ha comentado en el apartado 4.4.3.

Por otra parte, y como ya se ha comentado también en el apartado 4.4, se deberá prestar atención a los resultados del proyecto SAFETRAM, sobre todo en lo que se refiere a la posibilidad de aplicación del mismo para el establecimiento de unos estándares de resistencia estructural de los vehículos de tranvía y tranvitrén a nivel europeo. En caso de que se desarrolle este tipo de normativa, será, por supuesto, de aplicación a las aplicaciones de tranvitrén sobre líneas de FEVE.

REFERENCIAS

- [1] AUSSCHUSS FÜR BAHNBAU, SCHIENENFAHRZEUG-AUSSCHUSS, *Einsatz von Stadtbahn-Fahrzeugen im Mischbetrieb nach BOStrab und EBO*, Köln: VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen), julio 1995. (COMISIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE FERROCARRILES, COMISIÓN DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS, *Recomendaciones para la Operación de vehículos ferroviarios urbanos en explotación mixta conforme a BOStrab y a EBO*, Colonia: VDV (Asociación de Empresas de Transporte Alemanas), julio 1995.
- [2] CEN (Comité Europeo de Normalización), Norma UNE-EN 12663: *Aplicaciones ferroviarias. Requisitos de dimensionamiento de las estructuras de los vehículos ferroviarios*, Madrid: Junio 2001, AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación).
- [3] DEGAND, J.-C., JOUBERT, D., BARBET, J.-F., Tram-train system risk analysis, *Standard Tram-Train Rolling Stock Seminar*, París, 26-27 abril 2001.
- [4] DEGAND, J.-C., Le périurbain: avancement d'une démarche partagée, *Revue Générale des Chemins de Fer*, diciembre 2001, p. 13-18. ISSN: 0035-3183.
- [5] EUROPEAN COMMUNITY, *SAFETRAIN: Train Crashworthiness for Europe. Final Report*, Bruselas: Industrial & Materials Technologies Programme (Brite/Euram III), European Community, 2001.
- [6] EUROPEAN COMMUNITY, *SAFETRAM: Passive Safety of Tramways for Europe. Mid-Term Report*, Bruselas: Competitive and Sustainable Growth' Programme, European Community, enero de 2003.
- [7] FÜSER, S., VOSS, G., Homologation of Light Railcars and Multiple Units, *Railway Technical Review (RTR)*, 3-4 2000, p. 4-10.
- [8] GRAUF, H.-H., Rechtliche Aspekte des TramTrain, *TramTrain 2002 Congress*, Karlsruhe, 16-18 octubre 2002.
- [9] GRIFFIN, T., Inter-operable urban rail transport, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transport*, paper C514/035, Londres: IMECHE (Institution of Mechanical Engineers), 1996, p. 109-118.
- [10] GRIFFIN, T., *Obstacles to Internal Market in Rail Mass Transit. Final Report*, Derby: AEA Technology Rail, estudio encargado por la European Community, 2000.
- [11] KEUDEL, W., Zulassung von Fahrzeugen nach EBO und BOStrab am Beispiel der Stadtbahn Saar, *Elektrische Bahnen*, 2002, agosto-septiembre, n° 100, p. 298-306. ISSN 0013-5437
- [12] SAFETY AND STANDARDS DIRECTORATE, *Railway Group Standard GM/RT-2452, Acceptance of Trams and Light Rail or Metro Vehicles for Shared Running on Railtrack Controlled Infrastructure*, Londres: febrero 1999, Railtrack.
- [13] SAFETY AND STANDARDS DIRECTORATE, *Guidance Note GE/GN-8502, Operation of Trams and Light Rail or Metro Vehicles Over Railtrack Controlled Infrastructure*, Londres: febrero 1999, Railtrack.
- [14] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, *TCRP Synthesis 25: Light Rail Vehicle Compression Requirements*, Washington: Transit Cooperative Research Program, Federal Transit Administration, 1997.

- [15] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, *TCRP Report 52: Joint Operation of Light Rail Transit or Diesel Multiple Unit Vehicles with Railroads*, Washington: Transit Cooperative Research Program, Federal Transit Administration, 1999.
- [16] TRANSPORTCONSULT, *Gutachten zum Einsatz von Leichten Nahverkehrstriebwagen (LNT) im Mischbetrieb mit EBO-Fahrzeugen auf Eisenbahnstrecken des öffentlichen Verkehrs - Zusammenfassung -*, Berlín: noviembre 1993, Número 70-404/92, encargado por Der Bundesminister für Verkehr. (TRANSPORTCONSULT, *Informe pericial sobre la puesta en servicio de automotores ligeros para servicios metropolitanos (LNT) en explotación mixta con vehículos EBO sobre vías de ferrocarril convencional - Resumen -*, Berlín: noviembre 1993, Número 70-404/92, encargado por el Ministerio Alemán de Tráfico).
- [17] TRANSPORTCONSULT, *Ergänzendes Gutachten zum Einsatz von LNT im Mischbetrieb mit EBO-Fahrzeugen auf Eisenbahnstrecken des öffentlichen Verkehrs - Schlussbericht -*, Berlín: marzo 1995, Número 70-547/94, encargado por Der Bundesminister für Verkehr. (TRANSPORTCONSULT, *Informe pericial sobre la puesta en servicio de automotores ligeros para servicios metropolitanos (LNT) en explotación mixta con vehículos EBO sobre vías de ferrocarril convencional - Informe final -*, Berlín: marzo 1995, Número 70-547/94, encargado por el Ministerio Alemán de Tráfico).
- [18] UIC, Norma UCI-651: *Constitution des cabines de conduite des locomotives, automotrices, rames automotrices et voitures-pilotes*, 3ª edición, París: UIC (Union Internationale des Chemins de Fer), abril 2001.
- [19] UITP LIGHT RAIL COMMITTEE, *Track sharing*, Montpellier: UITP (Union Internationale des Transports Publics), julio 2001.
- [20] WANSBEEK, C.J., Messina: Quality trams arrive in Sicily, *Tramways and Urban Transit*, noviembre de 2000, nº 755, p.416-418. ISSN: 1460-8324.
- [21] WOLTER, W., Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen, *EI - Eisenbahningenieur*, 2001, mayo, nº 52, p. 63-68. ISSN 0013-2810.

Capítulo 6

TRACCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

Como se ha comentado anteriormente, en el caso de la tracción del vehículo el problema que se plantea deriva de las distintas tensiones de alimentación de los sistemas de metro ligero con respecto a los ferrocarriles convencionales.

En lo que se refiere a las líneas de metro ligero, la mayoría de estas líneas se electrifican con una tensión comprendida entre los 600 y los 750 V CC, siendo la tendencia actual la de utilizar este último valor. Por ello, se supone que en el caso de querer compatibilizar un sistema de metro ligero con las líneas ferroviarias de FEVE la tensión que se encontrará en el metro ligero será de 750 V CC, dado que se tratará de un sistema de reciente creación. Esta tensión es la que se ha utilizado en todos los sistemas de metro ligero que se han implantado en los últimos años en España, es decir, el tranvía de Valencia, el de Barcelona y el de Bilbao.

Por su parte, las líneas de FEVE que están electrificadas tienen una tensión de tracción de 1 500 V CC. Si bien es verdad que la mayor parte de las líneas de FEVE están sin electrificar (según datos del Informe Anual de la empresa correspondientes al año 2001 sólo 337,4 km, de un total de 1 266,5 km de vías estaban electrificados [8]), es destacable el hecho de que los tramos electrificados son los que se encuentran en el entorno de los núcleos urbanos por los que pasa la red, y por tanto, los más susceptibles de ser utilizados en el caso de implantación de servicios de tipo tranvitrén.

En efecto, los tramos de líneas de FEVE que se encontraban electrificados a 31 de diciembre de 2001 eran los siguientes (véase la figura 6.1):

- ☐ El tramo que une Gijón con Cudillero, pasando por Avilés y Pravia.
- ☐ El tramo que une Gijón con Oviedo, y los ramales que desde la estación de Berrón de este mismo tramo llegan hasta Pola de Siero y Pola de Laviana (pasando por La Felguera).
- ☐ El tramo que une Santander con Cabezón de la Sal, pasando por Torrelavega.
- ☐ El tramo que va de Santander a Liérganes.
- ☐ El tramo que va desde Bilbao a Balmaseda.

Si se quiere establecer un sistema de tranvitrén que circule sobre vías tranviarias urbanas y sobre vías ferroviarias de FEVE habrá que solucionar el problema de la diferente tensión de alimentación en los distintos ámbitos, y también el de la no existencia de electrificación en el ámbito ferroviario, ya que, aunque en principio las líneas más susceptibles de utilización son las más cercanas a las ciudades, que están electrificadas, no debería establecerse a priori la limitación de que los servicios de tranvitrén sólo puedan utilizar dichas líneas.

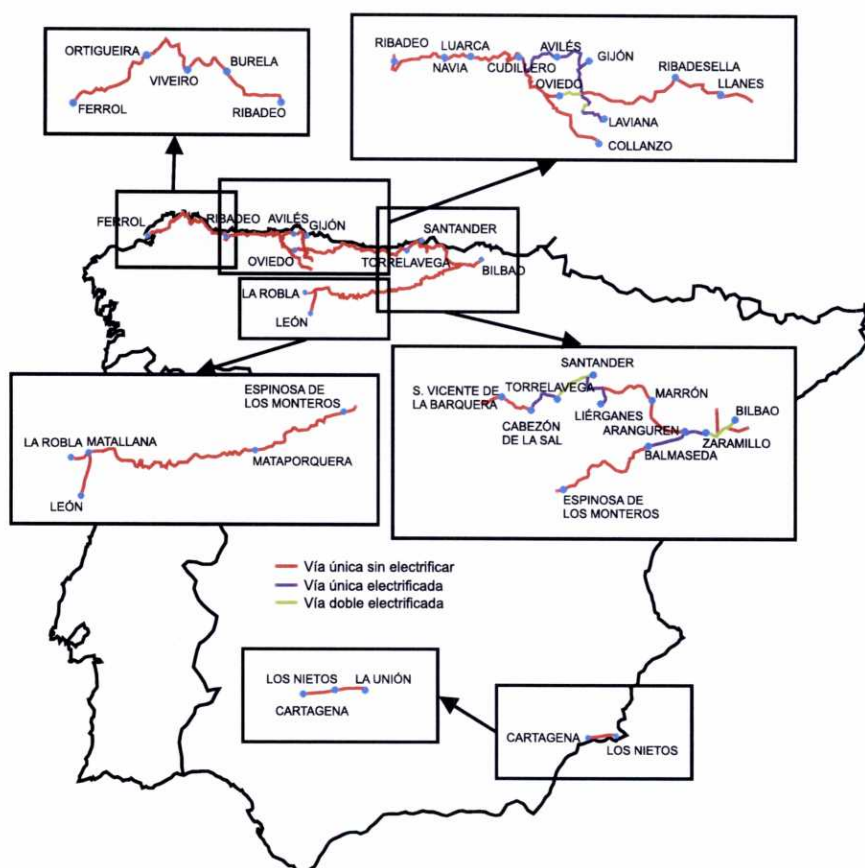


Figura 6.1: Red de FEVE en España.
Fuente: elaboración propia a partir de [8].

2. SOLUCIÓN ADOPTADA EN OTROS PAÍSES

Este mismo problema de distinta tensión de alimentación en los distintos ámbitos por los que va a circular el tranvitrén se ha producido también en el resto de los países en que han implantado o se plantean la implantación de un sistema de este tipo, si bien las tensiones de alimentación de que se trata son diferentes.

En este apartado se estudiarán las tensiones de alimentación de cada país en concreto y las soluciones que se le ha dado al problema en cada caso. Se verá que las soluciones adoptadas son similares en todos ellos.

2.1. ALEMANIA

2.1.1. Karlsruhe

Como se ha comentado en otros capítulos, la primera explotación de tranvitrén que se ha realizado en Europa fue la del tranvitrén de Karlsruhe, en Alemania. En este caso se realizaba la compatibilización de la red tranviaria de la ciudad, electrificada en 750 V CC, con las líneas de la DB (*Deutsche Bahn*), electrificadas en 15 kV CA a 16 2/3 Hz.

La solución al problema de la tracción se consiguió en el material móvil del sistema de tranvitrén, de tal manera que se diseñó un vehículo (el GT8-100C/2S) que es capaz de tomar la electricidad de los hilos tranviarios urbanos a 750 V CC así como de la catenaria ferroviaria a 15 kV 16 2/3 Hz.

El diseño de la parte eléctrica corrió a cargo de la ABB Henschel, y se caracterizó por la construcción del chopper⁽¹⁾ en un formato extremadamente compacto, medida absolutamente indispensable debido al restringido espacio de que se dispone en los vehículos.

El equipamiento eléctrico adicional está constituido, básicamente, por un transformador y un rectificador que convierten la corriente de 15 kV CA en 750 V CC y alimentan al equipamiento de corriente continua del vehículo. Esto convierte al vehículo bimodal en un vehículo de corriente alterna con su propia subestación rectificadora a bordo.

Todo el equipamiento adicional se instala en la sección central del vehículo, sobre el techo o bajo el suelo, por lo que no se elimina ningún espacio de asientos en el compartimento de pasajeros (véase la figura 6.2).

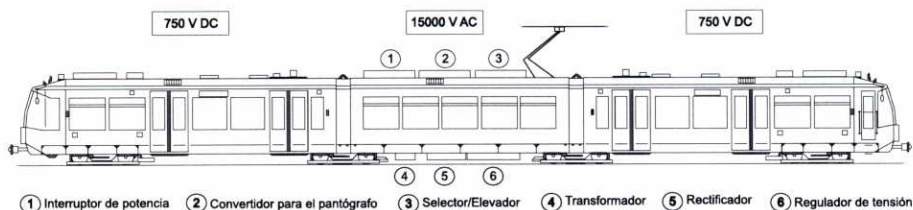


Figura 6.2: Equipamiento de tracción del vehículo de Karlsruhe.

Fuente: Modificado a partir de [7].

En la vía, las transiciones entre la alimentación de corriente continua y de corriente alterna están colocadas fuera de restricciones como señales, pasos a

⁽¹⁾ Chopper: Dispositivo eléctrico de potencia que partiendo de una fuente de corriente continua a tensión dada, permite variar la tensión aplicada al motor de tracción de forma continua.

nivel y paradas, para permitir el paso de los vehículos de metro ligero a plena velocidad, de manera que atraviesan esta sección de tensión nula gracias a la inercia.

En estas zonas, el vehículo cambia automáticamente a la otra tensión sin que se requiera ninguna acción por parte del conductor, más que la colocación del regulador de tracción en posición neutra. La electrónica de a bordo detecta la sección neutra entre los dos modos de alimentación de catenaria y abre automáticamente el disyuntor. Una vez que se detecta la nueva tensión de servicio el sistema selecciona la posición de conmutación correspondiente y vuelve a cerrar el disyuntor. El conductor puede seguir esta operación observando el voltímetro de tensión de línea y tres pictogramas de control en su pupitre.

Para prevenir cualquier tipo de fallo se han establecido sistemas de seguridad integrales, como la colocación de una sección neutra de 170 m entre las porciones de línea con diferente electrificación, de manera que se evita la alimentación al vehículo con corrientes distintas a la vez incluso con las composiciones de vehículos más largas.

En caso de fallo del sistema no es necesaria la actuación del conductor. Si el disyuntor no se abre en un tiempo de tres segundos desde la entrada del vehículo en la sección neutra, el pantógrafo se baja automáticamente y no se podrá levantar de nuevo hasta que el interruptor de potencia esté abierto.

2.1.2. Saarbrücken

En el caso de Saarbrücken el problema de la electrificación se resolvió de manera similar a Karlsruhe, salvo en lo que se refiere a la sección de cambio de una tensión de electrificación a otra, cuya longitud es ahora de 80 m en lugar de los 170 m citados anteriormente.

Con respecto al vehículo, el esquema del mismo, con todos sus elementos, se presenta en la figura 6.3. Los equipos eléctricos se reparten, al igual que en el caso de Karlsruhe, sobre el techo y bajo la caja del vehículo.

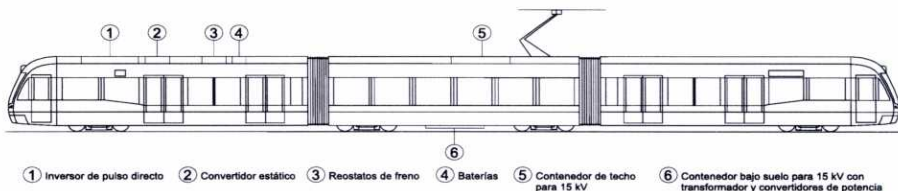


Figura 6.3: Equipamiento de tracción del vehículo de Saarbrücken.

2.1.3. Normativa alemana

Las recomendaciones de la VDV (*Verband Deutscher Verkehrsunternehmen*) para la operación de vehículos ferroviarios urbanos en explotación mixta conforme a BOStrab y EBO [2], establecen que se debe intentar aprovechar la electrificación ya existente en las zonas urbanas (por regla general en el entorno de 600 a 750 V CC), de manera que sobre estas líneas, además de los vehículos ferroviarios urbanos, sólo podrán circular vehículos diesel.

Por otra parte, si las líneas ferroviarias tienen ya una tensión de alimentación (por regla general 15 kV 16 2/3 Hz) que no puede cambiarse, o si una línea que no estaba electrificada sólo puede electrificarse con el sistema del ferrocarril convencional, se establece que el vehículo de tranvitrén tendrá que estar adaptado para ambos sistemas.

Otras alternativas de tracción para el tranvitrén contempladas en estas recomendaciones son los acumuladores de energía (aunque se especifica que este sistema todavía no resulta rentable para la explotación de ferrocarriles urbanos), y la tracción híbrida (mediante un grupo electrógeno embarcado).

Con respecto a los puntos de cambio entre un sistema y otro, estas recomendaciones establecen que deben estar muy bien definidos en lo referente a su situación, debiendo estar situados, si es posible, en una zona libre de la vía, y apartados de puntos conflictivos (señales, pasos a nivel, lugares de parada), con el fin de asegurar la libre circulación del vehículo por esta zona. Los puntos de cambio no tienen que coincidir obligatoriamente con el lugar de paso de la red tranviaria (regida por la BOStrab) a la red ferroviaria (regida por la EBO).

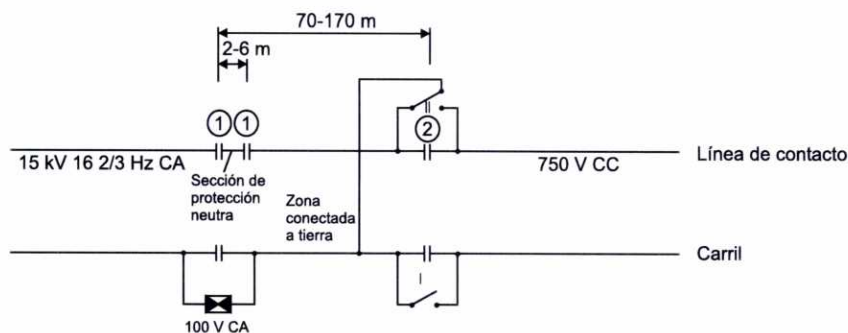
Se establece como configuración del punto de cambio de sistema la presentada en la figura 6.4, para evitar fugas de corriente y para asegurarse de que no llegue ninguna corriente inapropiada al vehículo.

Con respecto a la seguridad en el cambio del sistema, se establece que es necesario desarrollar regulaciones locales para evitar “alimentaciones equivocadas” (es decir, que un vehículo de CC se introduzca en la red de 15 kV, o que un vehículo ferroviario convencional lo haga en la red tranviaria).

2.2. GRAN BRETAÑA

En el caso de Sunderland, el sistema de metro utiliza una línea de la Railtrack que no disponía de electrificación, y que será electrificada en la tensión del metro (1 500 V CC), instalándose el sistema a una altura estándar que no debe ser menor de 5,6 m sobre el nivel del carril [20].

Sin embargo, este no es un caso que se pueda tomar como estándar, ya que implica que las líneas de Railtrack que se pretenda utilizar no estén electrifica-



Si un vehículo se detiene en una zona conectada a tierra, se pueden suministrar 750 V CC. El sentido de marcha admitido entonces es siempre hacia los 750 V CC.
Líneas con 0 V al menos 4 % en un sentido

Sección neutra:
Conectar: primero I, luego II
Desconectar: primero II, luego I
(I y II corresponden a la secuencia de conexiones acopladas y enclavadas mecánicamente).

- ① Separador de la DB
- ② Separador de tranvías con patín neutro

Figura 6.4: Punto de cambio de sistema de electrificación.

Fuente: [2].

das, y que además sean susceptibles de electrificarse con la tensión del sistema de tranvitrén. Este hecho no siempre será así, ya que la empresa propietaria de la línea puede querer reservarse el derecho a electrificarla en su tensión, para que la línea pueda ser utilizada en el futuro por vehículos ferroviarios convencionales con tracción eléctrica.

Para los casos de este tipo, en que el suministro eléctrico lo utilizan solamente los vehículos de metro ligero, la norma británica Guidance Note GE/GN-8502 [19] establece que dicho suministro eléctrico debe estar controlado por la administración externa en lugar de Railtrack, como una extensión de su sistema existente. Para ello, será necesario que Railtrack demuestre, en su *Railway Safety Case* (documento en que se justifican las condiciones de seguridad del sistema), tanto la adecuación del sistema empleado para controlar el suministro de potencia (incluyendo las configuraciones para conectar con el centro de control para realizar conmutaciones de emergencia), como la competencia del personal implicado.

Si bien la normativa británica no establece ninguna otra especificación sobre el tema, sí se han realizado estudios más detallados en los documentos que han servido de base para la redacción de dicha normativa. Así, en el documento "Estándares para compartir vías de metro ligero y ferrocarril convencional", llevado a cabo por la *British Rail Research* en junio de 1993 [4], se estudian los posibles escenarios que se pueden encontrar a la hora de compatibilizar sistemas de metro ligero con líneas de la *British Rail*. Los casos que se estudian son: que la línea de la BR no tenga ningún sistema de electrificación; que esté electrificada en 25 kV CA; o que esté electrificada en 630 / 750 V CC con tercer carril.

Por su parte, el Informe técnico del estudio citado anteriormente [5] establece, entre otras cosas, que para el caso de una línea de la *British Rail* electrificada en 25 kV CA (que será el caso más corriente entre las líneas electrificadas), la única opción que se plantea es la utilización de dicha línea mediante un vehículo de tranvitrén bitensión.

En ese mismo documento se estudian los problemas potenciales que pueden aparecer asociados a cada escenario de electrificación. Entre ellos se plantean:

- ☐ Interferencias producidas por la catenaria del metro ligero, con los sistemas eléctricos, de comunicaciones y electrónicos de los vehículos ferroviarios convencionales. Se debe garantizar en la fase de diseño que no se produce ningún problema, o tomar las medidas preventivas necesarias.
- ☐ Distancia libre respecto a la catenaria del metro ligero: la electrificación de una línea existente con catenaria de metro ligero se debe diseñar de manera que las condiciones de gálibo se cumplan para todos los vehículos que utilizan la línea.
- ☐ Distancia libre respecto al carril conductor, en el caso de alimentación eléctrica mediante tercer carril: se deberán mantener los gálibos eléctricos adecuados entre los vehículos de metro ligero y el carril conductor. Esta comprobación es necesaria debido a que los vehículos de metro ligero pueden ser más anchos que los vehículos ferroviarios convencionales en las partes bajas del vehículo.
- ☐ Interferencias causadas por la electrificación del ferrocarril convencional: el sistema de metro ligero debe estar diseñado para soportar la contaminación electromagnética que genere el sistema de electrificación del ferrocarril convencional.
- ☐ Circuitos de vía incompatibles: si se establece una nueva electrificación en una línea que no estaba electrificada, se debe comprobar que este hecho no afecta a los circuitos de vía, y en caso de que sí lo haga, se debe modificar el sistema del circuito de vía.

En dicho Informe técnico también se establecen unas soluciones recomendadas para cada escenario de electrificación, que son las siguientes:

- ☐ Para el caso de líneas no electrificadas, se pueden electrificar en la tensión del metro ligero, siempre que se cumplan las precauciones ya mencionadas.
- ☐ Para el caso de líneas electrificadas en 25 kV CA, las opciones que se plantean son tres: vehículo de metro ligero híbrido en 25 kV CA / 750 ó 1 500 V CC (ya que la electrificación de los sistemas de metro ligero en

plataforma totalmente reservada es con una tensión de 1 500 V CC); vehículo con tracción por baterías; o vehículo con tracción diesel.

Para el caso del vehículo bitensión se plantean la utilización de un sistema de cambio similar al de Karlsruhe, sometido a la aprobación del *Railway Inspectorate*⁽²⁾. El punto de cambio se podría situar en la zona de metro ligero, antes de su unión con la línea ferroviaria convencional.

Con respecto a la tracción por baterías, se señala que puede ser viable, aunque la penalización por peso puede ser bastante alta, salvo que la sección compartida sea muy corta.

Con respecto a la tracción diesel, se establece que, aunque no hay ninguna razón fundamental para que los sistemas de metro ligero no puedan utilizar tracción diesel en toda su longitud, la aceptación pública de este tipo de sistemas se basa en el atractivo de utilizar tracción eléctrica, especialmente en entorno urbano. Se podría usar este sistema cuando la circulación por la calle no exista o sea mínima.

Por otra parte, se establece que es viable utilizar un pequeño motor diesel para generar potencia eléctrica para la operación del metro ligero eléctrico sobre secciones cortas de vía compartida. De nuevo el peso del equipamiento adicional puede convertirse en un problema. Si los vehículos de metro ligero son de piso bajo, es probable que esto sólo se pueda conseguir a costa de espacio para pasajeros.

- Para el caso de líneas ferroviarias electrificadas mediante tercer carril, se establece la posibilidad de introducir una línea aérea de metro ligero, o de desarrollar vehículos de metro ligero que sean capaces de utilizar el sistema de electrificación existente. Para esta segunda opción se establecen unas precauciones adicionales.

2.3. FRANCIA

Para el caso francés, la electrificación en las líneas de la SNCF objeto de proyectos de tranvitrén es de 25 kV 50 Hz CA, mientras que la electrificación de los sistemas de metro ligero es de 750 V CC.

El vehículo tipo (*Avanto*, de Siemens) que se ha contratado para el tranvitrén francés es un vehículo bitensión, de manera que pueda circular por los dos tipos de redes tomando la tensión correspondiente en cada una.

⁽²⁾ Her Majesty's Railway Inspectorate (HMRI): es una parte del Health and Safety Executive británico que se encarga de asegurar el control apropiado de riesgos y seguridad de pasajeros, trabajadores y cualquier otra persona que se puede ver afectada por la explotación de los ferrocarriles británicos.

El planteamiento es similar a lo ya explicado anteriormente para Alemania y Reino Unido.

3. OPCIONES PARA EL CASO FEVE

Las opciones que se pueden plantear como solución ante las diferentes tensiones de tracción en el caso FEVE se pueden orientar según alguno de los dos planteamientos siguientes:

- ☐ Tratar de solucionar el problema en la infraestructura, utilizando un vehículo típico de los que ya existe en el mercado.
- ☐ Tratar de solucionar el problema en el vehículo, de tal manera que la infraestructura ferroviaria se deja como está, y la tranviaria se deja también como está si ya existe, o bien se implanta de la manera más habitual en el momento de su creación, en el caso de que sea de nueva construcción. En este caso, los problemas derivados de la diferentes tensión de electrificación entre los dos ámbitos (tranviario y ferroviario) deberán solucionarse con modificaciones en el vehículo.

La única solución que se plantea en la que el problema se resuelve en la infraestructura, consiste en el establecimiento de la electrificación del sistema de metro ligero en 1 500 V CC, de tal manera que la entrada en las vías de FEVE no presente problemas en lo que se refiere a la tensión de tracción.

Como opciones de solución resolviendo el problema en el vehículo se presentan las siguientes:

- ☐ Utilización de un vehículo de tranvitrén bitensión 750 / 1 500 V CC, que sea capaz de tomar la tensión de la catenaria tanto en zona urbana como en zona ferroviaria.
- ☐ Utilización de un vehículo de tranvitrén de tracción híbrida (diesel-eléctrica), de tal forma que en los recorridos urbanos tome la tensión de la catenaria de 750 V CC, pero que al entrar en las líneas ferroviarias de FEVE utilice el grupo diesel para propulsarse; o bien al contrario: que en las líneas de FEVE use la catenaria si existe, y en la zona urbana utilice la propulsión diesel.
- ☐ Utilización de un vehículo con propulsión únicamente diesel para toda la longitud de las líneas por las que circule.
- ☐ Utilización de vehículos de tranvitrén con tracción por baterías.
- ☐ Utilización de vehículos de tranvitrén con volantes de inercia.

- ☐ Utilización de vehículos de tranvitrén con tracción por supercondensadores.
- ☐ Utilización de vehículos de tranvitrén propulsados mediante pilas de combustible.

Como ya se ha comentado anteriormente, FEVE tiene algunas líneas electrificadas (principalmente las que se encuentran en el entorno de las ciudades), mientras que el resto de sus líneas están sin electrificación, y son operadas mediante vehículos diesel.

Para el caso de las líneas sin electrificación se pueden plantear varias soluciones:

- ☐ Dotar a las líneas de la electrificación estándar de FEVE antes de implantar los servicios de tranvitrén. En este caso pasaríamos a la situación de dos tensiones de electrificación distintas según el ámbito de circulación.
- ☐ Dotar a las líneas de FEVE de la electrificación del sistema de metro ligero, es decir, con una tensión de 750 V CC. Aunque esta actuación es posible, produce una limitación a la explotación ferroviaria, debido a que estas líneas ya no podrán ser utilizadas más que por vehículos ferroviarios convencionales con tracción diesel. Por este motivo, es de esperar que FEVE no permita este tipo de actuación, que supondría una limitación a las posibilidades de explotación futura por parte de FEVE sobre esas líneas, y a futuras actuaciones de mejora de las mismas por parte de la empresa.

Además, si esto se llevase a cabo, la línea aérea pertenecería normalmente a la empresa de explotación del tranvitrén, mezclándose así varios propietarios para distintas partes de la misma infraestructura, hecho que complicaría la explotación y que, de forma segura, FEVE no aceptaría de buen grado.

Es por ello que esta solución no se recomienda, dado que daría lugar a numerosos problemas.

- ☐ Dejar las líneas de FEVE sin electrificación, y utilizar alguna de las tecnologías que no la necesitan, como puede ser la tecnología híbrida diesel-eléctrica, baterías, supercondensadores, etc.

A continuación se estudiarán las opciones que se han planteado, tratando de determinar la viabilidad y conveniencia de cada una de ellas, para obtener los fundamentos necesarios para la elección de la solución más apropiada.

3.1. SISTEMA DE METRO LIGERO EN 1 500 V CC

Como se ha comentado ya con anterioridad, esta es la única solución en la que el planteamiento consiste en resolver el problema en la infraestructura, de manera que el vehículo sólo reciba la corriente en una determinada tensión a lo largo de todo su recorrido, simplificándose así el diseño del mismo.

Con esta solución se podrían utilizar directamente las líneas de FEVE que estén electrificadas en 1 500 V CC, produciéndose las siguientes ventajas respecto a la opción anterior:

- ☐ Por una parte, ya no sería necesaria una zona de cambio del sistema de alimentación, eliminándose por tanto un elemento de nuevo diseño que puede dar lugar a complicaciones.
- ☐ Por otra parte, el vehículo no necesita estar dispuesto para recibir la alimentación eléctrica bajo dos tensiones diferentes, por lo que se tendría un equipamiento eléctrico más simple, similar al de cualquier vehículo ferroviario que circule bajo tensión de 1 500 V CC, que ya están desarrollados y ampliamente probados.

Sin embargo, para que se pueda utilizar un vehículo de tranvitrén en 1 500 V CC, es necesario que toda la línea o líneas de metro ligero por las que tenga que circular dicho vehículo funcionen bajo dicha tensión. Esto incluye las zonas del entorno urbano por las que discurra la red de metro ligero, compartiendo o no su plataforma con el tráfico rodado.

Pues bien, a pesar de que la tensión de 1 500 V CC se considera “baja tensión” según el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, no es usual su disposición en entorno urbano, sin ningún tipo de vallado o cerramiento, y compartiendo plataforma con la circulación rodada. Este hecho podría hacer pensar que existe algún motivo técnico por el que no se deban disponer tensiones tan elevadas en zonas urbanas, pero a la vista de la investigación realizada para la presente Tesis no parece ser así. De hecho, a continuación expondremos varios casos de líneas de metro ligero / tranvía o ferroviarias, que circulan en ciertos tramos de su recorrido, bajo catenaria de 1 500 V CC, compartiendo la plataforma con el tráfico urbano.

3.1.1. La línea Ohtsu-Kyoto, en Japón

Por la ciudad de Kyoto circulaba una línea ferroviaria, por la calle, bajo una catenaria de 600 V CC, pero en el año 1997 se decidió convertirla a tecnología de metro, soterrándola y aumentando la tensión de alimentación a 1 500 V CC. Ésta es la línea que actualmente se conoce con el nombre de Línea Tozai [1].



Figura 6.6: Vehículo bajo 1 500 V CC circulando por la calle.
Fuente: [1].



Figura 6.7: Entrada de la línea de ferrocarriles Keihan en el entorno urbano.

Finalmente, en 1995, el último tramo y la antigua estación de superficie de Chauderon se han cerrado debido a la prolongación del recorrido subterráneo, por lo que sólo queda una zona de unos 1 000 m de recorrido urbano en plataforma reservada bajo tensión de 1 500 V CC. Sin embargo, el hecho de que hasta 1995 se tuviesen tramos de tráfico compartido bajo esta tensión parece poner de manifiesto que esto no supone mayor problema en el entorno urbano.

En las figuras 6.8 y 6.9 se presenta el ferrocarril de Lausanne en una parada en plataforma reservada y circulando por las calles de la ciudad.

En Suiza existen otras líneas de ferrocarriles con alimentación eléctrica bajo 1 500 V CC con tramos de vía compartida con el tráfico rodado en entorno urbano. Otros ejemplos podrían ser los siguientes:

- ❑ La línea ASD (Aigle-Sépey-Diablerets), de la que se muestra un vehículo circulando por la calle en la figura 6.10.
- ❑ La línea AL (Aigle-Leysin), de la que se muestra otro vehículo en la figura 6.11.
- ❑ Los Chemins de Fer du Jura, que con un ancho métrico y con una tensión de 1 500 V CC, circulan en tráfico compartido por la calle en la ciudad de La Chaux de Fonds. En este caso, para garantizar la seguridad de los vehículos y de los peatones, la altura del punto de contacto es de 6 m, salvo en una zona en la que la altura está restringida, en donde la catenaria se ha protegido de manera especial para que los vehículos rodados no puedan chocar con ella. En la figura 6.12 se presenta un vehículo circulando por la calle en esta línea bajo 1 500 V CC.



Figura 6.8: Ferrocarril LEB en parada con plataforma reservada.



Figura 6.9: Ferrocarril LEB en trazado urbano.

La opción de introducir un metro ligero bajo una tensión de 1 500 V CC en la calle se baraja también en el Estudio Europeo sobre el tranvitrén [20] como opción para la ciudad de Aachen. En dicho estudio se plantea que aunque los sistemas de metro ligero en Alemania suelen circular bajo una tensión de 750 V CC, se está promoviendo últimamente desde industria la utilización de una tensión de alimentación de 1 500 V CC, porque tensiones mayores permiten o bien mayores distancias entre subestaciones o bien secciones de cable más pequeñas. Además, en el caso de esta ciudad, la implantación de un sistema de metro ligero bajo 1 500 V permitiría una conexión directa con el sistema de alimentación eléctrica de los ferrocarriles holandeses en CC.

Por otra parte Harry Hondius, consultor independiente de la ÖPNV (*Öffentlicher Personennahverkehr*, Empresa de Transporte Público Urbano alemana) en el área de vehículos, recomienda, en un artículo publicado en la revista RTR (*Railway Technical Review*) en el año 1998 [10], que la tensión de 1 500 V CC debería



Figura 6.10: Vehículo de la ASD circulando por la calle con tráfico compartido.



Figura 6.11: Vehículo de la AL circulando por la calle con tráfico compartido.

ser la que se estableciese en cualquier red completamente nueva que se vaya a construir en el futuro.

Por tanto, con todo lo expuesto en este apartado parece quedar patente la posibilidad de explotación de sistemas de metro ligero en 1 500 V CC en la calle. Esta explotación supone múltiples ventajas, dado que al ser mayor la tensión se pue-



Figura 6.12: Vehículo de los Chemins de Fer du Jura circulando por la calle con tráfico compartido.

de utilizar un cable de menor sección para transportar la misma corriente, y se pueden separar más las subestaciones entre sí, de manera que se ahorra en el número de éstas, hecho importante de cara a los costes de implantación de la línea aérea. Es por estas ventajas que, como ya se ha comentado, se está intentando promover esta tensión para las explotaciones de nueva creación en toda Europa.

La única duda que se puede plantear se refiere a los problemas de afección que, desde el punto de vista electrotécnico, pueda presentar este tipo de explotación, en relación con el aislamiento, las corrientes vagabundas, la afección al entorno habitado, etc. Para resolver este problema se hace necesario el desarrollo de un reglamento orientado a establecer las condiciones necesarias para que este tipo de explotación funcione de forma segura.

Por todo ello, se recomienda la explotación del tranvitrén bajo 1 500 V CC en toda su traza, tanto sobre las líneas de FEVE como dentro del entorno urbano, dado que se considera un buen sistema siempre que se desarrollen los estudios y normativas apropiados para que sea seguro. Así, esta solución quedará condicionada al desarrollo del correspondiente reglamento para la explotación segura del sistema.

Se podría estudiar la opción de utilizar una alimentación eléctrica por tierra en 1 500 V CC, con un sistema de tipo Innorail, que se está probando en la actualidad en la ciudad de Bordeaux.

En este sistema, la alimentación eléctrica, en lugar de realizarse mediante una catenaria, se realiza mediante un tercer carril, que va enterrado por el medio de

la vía, pero que, para permitir la alimentación segura incluso con plataforma compartida, sólo se activa (es decir, sólo transmite corriente) en las secciones que se encuentran justo debajo del vehículo. Esto se consigue mediante una disposición especial del carril de contacto, en el que se alternan secciones de 8 m de carril activo con secciones neutras de 3 m. Las unidades de control de potencia, situadas cada 22 m son las que activan la sección correspondiente al pasar el vehículo (véase la figura 6.13) [3].

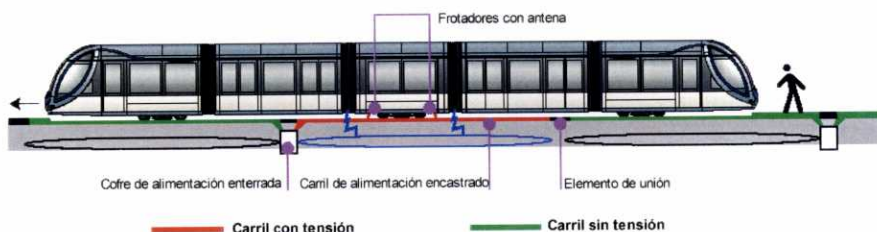


Figura 6.13: Sistema de alimentación eléctrica Innorail.
Fuente: [6].

Sin embargo, si se pretende utilizar este sistema para tensión de 1 500 V CC, se requerirán estudios detallados para garantizar que no se introducen riesgos adicionales al aplicarlo con dicha tensión (ya que el caso de la ciudad de Bordeaux es para 750 V CC) [24]. Se deberán considerar, asimismo, los costes de implantación de este sistema, ya que pueden ser mayores que los de alimentación por catenaria.

3.2. VEHÍCULO BITENSIÓN 750 / 1 500 V CC

Esta solución se engloba dentro del planteamiento de resolver el problema en el vehículo, de manera que, desde el punto de vista de las instalaciones fijas, esta solución sería muy sencilla, ya que se utilizarían, en lo que a la infraestructura se refiere, los sistemas ya habituales y muy conocidos en cada uno de los dos ámbitos. Este hecho hace que la construcción y mantenimiento de las líneas aéreas sean relativamente sencillos, o por lo menos muy estandarizados.

Por otra parte, esta solución sigue la filosofía que se ha establecido en las explotaciones existentes hasta el momento, en las que se suele resolver el problema por medio de la dotación del vehículo con el equipamiento adecuado para tomar la energía a partir de las dos tensiones de electrificación.

Esta solución tiene la ventaja de que, al ser 2 la relación existente entre la tensión del ámbito ferroviario y el tranviario, sería relativamente sencillo desarrollar un vehículo capaz de alimentarse bajo ambas tensiones, sin más que utilizar una disposición de motores de 750 V CC, que, en función del ámbito en que se encuentre el vehículo, se conectan en serie o en paralelo para tomar la corriente a la tensión adecuada. Ni que decir tiene que la moderna electrónica de potencia

ha superado con creces este problema. Sin embargo, esta solución implica cierta complicación en el equipo eléctrico del tranvitrén, ya que debe estar preparado para recibir una alimentación en dos tensiones diferentes, lo que producirá un cierto aumento del peso y del coste del mismo.

Se debe destacar que aunque en las explotaciones existentes nunca se ha utilizado un vehículo bitensión en 750 / 1 500 V CC, ya existen prototipos de estas características. De hecho, son varios los fabricantes que ofrecen sus vehículos de tranvitrén preparados para esta combinación de tensiones. Entre ellos están:

- ❑ El *Citadis 500*, de Alstom, que prevé dos combinaciones de tensión: 750 / 1 500 V CC y 750 V CC / 25 kV 50 Hz CA.
- ❑ El *Avanto*, de Siemens, que plantea varias combinaciones en corriente continua, entre las que se encuentra la de 750 / 1 500 V CC, y varias combinaciones también en corriente alterna, tanto para 15 como para 25 kV.

Las soluciones de vehículos bitensión para corriente continua se suelen caracterizar por el hecho de que todos los equipos son comunes para ambas tensiones, estando equipado el bloque tractor de cada coche con un ondulator, que toma la corriente continua y la transforma en corriente alterna, alimentando tras ello a un transformador, que es el que sube o baja la tensión en función de las necesidades de los motores de tracción de su correspondiente coche.

El funcionamiento del vehículo al circular por una zona con una tensión determinada y alcanzar la zona de cambio de sistema (cambio de tensión) se realiza de manera totalmente automática. El vehículo o las unidades acopladas en tracción múltiple, salen con la suficiente inercia del tramo por el que están circulando, el sistema de tracción de la primera unidad que sale capta tensión nula y se desconecta. Al entrar en el nuevo tramo, el sistema capta la nueva tensión, los contadores de conmutación se disponen en el sentido correspondiente y a continuación se coloca de nuevo bajo tensión el sistema de tracción. Las fases de este proceso se explican a continuación (véase la figura 6.14):

- ❑ Fase 1: El vehículo de tranvitrén se encuentra en la línea de 750 V CC.
- ❑ Fase 2: La unidad U2 entra en el tramo sin tensión. Su sistema de tracción se desconecta automáticamente (por “tensión nula”). La unidad central de con-

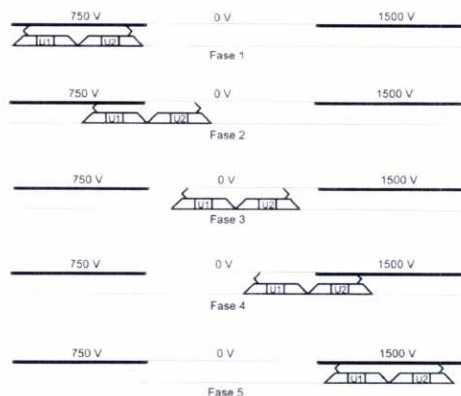


Figura 6.14: Esquema de paso por punto de cambio de tensión. Cortesía de Siemens.

trolo reconoce la situación e impide que el sistema de tracción de la U1 se desconecte por tensión nula, de tal manera que su sistema de tracción sigue funcionando con prestaciones reducidas.

- ❑ Fase 3: Las unidades U1 y U2 están en el tramo sin tensión. Ambos sistemas de tracción se desconectan automáticamente. La inercia empuja al vehículo por un corto espacio de tiempo, hasta que entra en la línea de 1 500 V CC.
- ❑ Fase 4: La unidad U2 entra en el comienzo de la línea de 1 500 V CC. Su sistema de tracción detecta automáticamente “tensión 1 500 V”. La unidad central de control reconoce la situación e impide que el sistema de tracción de la U2 se conecte por “tensión nula” en U1. El sistema de tracción de la U2 entra a continuación en funcionamiento con prestaciones reducidas.
- ❑ Fase 5: La unidad U1 entra en el comienzo de la línea de 1 500 V CC. Su sistema de tracción detecta automáticamente “tensión 1 500 V”. La unidad central de control reconoce la situación y libera el servicio para el 100% de tracción en ambas unidades.

En lo que se refiere a los sistemas de protección, los elementos conectados directamente a la tensión de catenaria de 1 500 V CC y 750 V CC, están protegidos por un disyuntor extrarrápido principal.

Aparte de la protección por medio del disyuntor extrarrápido principal, tanto el sistema de tracción como el convertidor estático de servicios auxiliares suelen disponer de sistemas de autoprotección, los cuales conducen a una autodesconexión del sistema, o partes de éste, en caso de producirse sobretensiones, cortocircuitos o situaciones similares.

En lo que se refiere a la infraestructura, el único elemento singular necesario para esta solución sería el punto de cambio de una tensión a otra, que, siguiendo las especificaciones establecidas para el caso alemán, debería estar situado en una zona sin ningún tipo de restricción (señalización, pasos a nivel o paradas), de tal manera que el vehículo circule por este tramo a la deriva, aprovechando la inercia de su movimiento.

Esta zona de transición estaría constituida por un tramo de catenaria con tensión nula, de longitud suficiente para que nunca se produzca una situación de alimentación en doble tensión (750 y 1 500 V CC) al vehículo, debido a que la primera unidad llegue a la zona de alimentación de 750 V antes de que la última unidad haya salido de la zona de alimentación en 1 500 V CC, o viceversa.

3.3. VEHÍCULO DE TRACCIÓN HÍBRIDA (DIESEL-ELÉCTRICA)

El planteamiento en este caso puede ser doble:

- Se podría plantear un vehículo con tracción híbrida (diesel-eléctrica), de tal manera que en la zona urbana circule bajo catenaria en tensión 750 V CC, es decir, la tensión estándar de metro ligero, y que utilice el grupo diesel cuando circule por las vías ferroviarias de FEVE. Esto supondría una buena opción desde el punto de vista ambiental, porque en la zona urbana, en la que hay más polución, se utiliza la energía más limpia de las dos, y en zona ferroviaria se podría circular tanto por las líneas de FEVE electrificadas como por las que están sin electrificar, sin necesidad de realizar inversiones en implantación de catenarias de nueva creación.

La circulación sobre las líneas de FEVE con el vehículo en modo diesel no debería entrañar ningún problema adicional, dado que ya existen circulaciones ferroviarias de este tipo utilizando dichas líneas.

- La segunda opción consistiría en que el vehículo utilizase la alimentación eléctrica del sistema anfitrión, es decir, 1 500 V CC de FEVE, aprovechando las instalaciones fijas ya dispuestas en sus líneas, en el caso de que vaya a circular por las líneas electrificadas. De esta manera, sería en zona urbana en donde utilizaría el grupo diesel para propulsarse.

Esta opción tendría la ventaja de que, en caso de ser un metro ligero de nueva creación, no habría que realizar las inversiones relacionadas con toda la línea aérea, y además se evitaría la intrusión visual que ésta tiene en zona urbana.

Sin embargo, esta opción tiene varios inconvenientes que conducen a que sea descartada. Por una parte, aunque no existe ninguna razón fundamental por la que los sistemas de metro ligero no puedan utilizar tracción diesel en toda o parte de su longitud, la aceptación pública de este sistema de transporte se basa en el atractivo de utilizar tracción eléctrica, especialmente en el entorno urbano, normalmente con problemas de polución (este hecho ya se ponía de manifiesto en los estudios ingleses). Por otra parte, esta opción supondría la limitación de circular únicamente por líneas de FEVE que estén electrificadas, o bien utilizar el grupo diesel también por las líneas de FEVE que estén sin electrificar.

Por tanto, se descarta esta opción frente a la anterior, que parece más razonable para el caso que se trata.

Así, a partir de ahora cuando se haga referencia a la opción de vehículo de tranvitrén híbrido se entenderá que se refiere a la opción 750 V CC / diesel.

Como inconveniente de esta opción se podría alegar el hecho de que el vehículo de tracción híbrida (diesel-eléctrica) puede llegar a tener un peso bastante mayor, debido a la necesidad de integrar el grupo diesel además del equipamiento eléctrico. Sin embargo, existen ya vehículos de este tipo, como es el caso del *Combino* de Nordhausen (desarrollado por la empresa Siemens), en el que exis-

ten dos versiones, una sólo en 750 V CC, que pesa en vacío 24 toneladas, y otra híbrida 750 V CC / diesel, que pesa en vacío 25 t (es decir, sólo un 4% más). La unidad de tracción diesel está compuesta por 8 cilindros de inyección directa, y ocupa 3 901 cm³. Se debe destacar que se trata de un vehículo con el 100% de piso bajo [21].

Este vehículo se pidió en diciembre de 2001, para la extensión de los servicios de metro ligero de Nordhausen sobre las líneas de ancho métrico no electrificadas de Harzer Schmalspurbahn. Se supone que estos vehículos entrarán en servicio en el tramo entre Nordhausen e Ilfeld a partir del año 2004.

3.4. VEHÍCULO DE PROPULSIÓN DIESEL

La utilización de un vehículo de tranvitrén diesel tendría, con respecto a la solución del vehículo híbrido, la ventaja de que el vehículo sería más sencillo, con propulsión únicamente diesel, como muchos vehículos ferroviarios ligeros existentes en el momento actual. Este vehículo resultaría más barato, más fácil de mantener y menos pesado que un vehículo híbrido.

Por otra parte, desde el punto de vista de la infraestructura tendría la ventaja de no necesitar electrificar la zona urbana, con lo que se produciría un ahorro en lo que se refiere a los costes de implantación y mantenimiento de la infraestructura, así como un menor impacto visual de la misma, al evitarse la línea aérea.

Asimismo, no estaría limitado a la circulación por las líneas de FEVE electrificadas, lo que produce una mayor flexibilidad y mayores posibilidades de ampliación del sistema.

Por tanto, con todo lo dicho hasta ahora, parecería que la utilización de un vehículo de tranvitrén diesel sólo traería beneficios. Sin embargo, existen ciertos inconvenientes importantes, como son: la polución, ya que el vehículo diesel da lugar a mayores emisiones que los vehículos eléctricos; el ruido, ya que el vehículo eléctrico produce niveles de ruido mucho menores que los vehículos con propulsión diesel; y el confort de marcha, ya que la circulación de los vehículos eléctricos es más suave que la de los diesel. Pero sobre todo, el inconveniente más importante, ya comentado en el apartado anterior, es el que se refiere a que la aceptación de los sistemas de metro ligero se basa en el atractivo de utilizar tracción eléctrica, dado que se trata de una energía limpia, y susceptible de provenir de energías renovables. Por ello, puede resultar que los usuarios potenciales del sistema vean defraudadas sus expectativas si se da el servicio con un vehículo diesel, que contamina y produce mayor ruido que los vehículos eléctricos que gozan de tan buena fama.

3.5. VEHÍCULO CON ACUMULADORES O BATERÍAS

Se podría considerar la utilización de un vehículo de tranvitrén que circule en la zona urbana bajo catenaria a 750 V CC, pero que al introducirse en las vías ferroviarias obtenga la energía de baterías o acumuladores previamente cargados.

Las baterías son dispositivos que almacenan y liberan energía a través de reacciones electroquímicas prácticamente reversibles.

Sin embargo, es conocido que este tipo de dispositivos tienen un tiempo de carga importante y un ratio peso/energía considerable, por lo que sólo se podrán utilizar de forma rentable en el caso de que las secciones de vía compartida sean cortas. Por ello, se deberán estudiar las posibilidades de aplicación para cada caso en concreto, pero no se puede presentar como una solución genérica, dado que su funcionamiento puede no ser eficiente si se deben recorrer largas distancias sobre líneas ferroviarias.

En la actualidad existen varios estudios de viabilidad técnica y económica de distintos tipos de baterías, pero todavía no se tienen conclusiones definitivas.

3.6. VEHÍCULO CON VOLANTES DE INERCIA

Los volantes de inercia son unos dispositivos que acumulan energía en un disco o un rotor con forma de rueda que gira a gran velocidad. Los volantes de inercia más modernos utilizan un rotor de composite con una gran resistencia que gira dentro de una cámara de vacío para minimizar las pérdidas aerodinámicas. En el eje del rotor se monta un motor/generador para aumentar la velocidad de giro del rotor, cuando se está cargando, o para convertir la energía cinética del mismo en energía eléctrica, cuando se está descargando. Es necesario utilizar un sistema de control electrónico para convertir la corriente alterna en corriente continua, establecer la potencia y controlar el volante de inercia.

Este tipo de dispositivos han sido utilizados desde hace varios años en los trolebuses de Basel (Suiza), y han demostrado recientemente sus prestaciones para otro tipo de aplicaciones. Por ejemplo, Siemens instaló un motor magnético con volante de inercia en una subestación tranviaria en Köln, al objeto de mejorar la recuperación de energía. Por otra parte, Alstom Transport ha hecho un ensayo de demostración para determinar la viabilidad de sistemas tranviarios bimodales basados en volantes de inercia.

Por tanto, se puede concluir que en un futuro estos dispositivos pueden constituir una opción a la hora de desarrollar vehículos híbridos. Sin embargo, en la actualidad están aún en etapa de desarrollo y no parecen una opción válida para utilizar de forma generalizada a corto plazo.

3.7. VEHÍCULO CON TRACCIÓN POR SUPERCONDENSADORES (ULTRACAPACITORS)

Los supercondensadores almacenan energía en forma de carga electrostática.

En la actualidad se está planteando la posibilidad de producir vehículos de tranvitrén que estén dotados con un dispositivo de suministro de energía a bordo que esté almacenada en supercondensadores. Cuando el vehículo está en la estación, estos supercondensadores se pueden cargar muy rápidamente gracias a su alta densidad de potencia, que era la limitación principal que presentaban los vehículos de baterías (debido a su largo tiempo de carga). Además, los supercondensadores también pueden proporcionar una alta eficiencia de recuperación de la energía de frenado, hecho interesante dado que los sistemas de tranvitrén tienen más paradas que los sistemas ferroviarios convencionales.

Los sistemas de recarga en estación todavía están en estudio. Se podrían obtener resultados adecuados mediante sistemas de tipo pantógrafo/catenaria, pero se están estudiando también otras alternativas, como por ejemplo sistemas de alimentación por tercer carril, o sistemas de bornes temporales, etc. Además, se puede plantear la carga de manera gradual, de forma que el vehículo comience a cargar sus dispositivos de almacenamiento de energía cuando se está aproximando a la estación, o bien que siga conectado eléctricamente en las primeras decenas de metros después de dejar la misma.

En la actualidad se está desarrollando en Francia el proyecto THALES, en el que se están estudiando las características de estos sistemas y las prestaciones que tendrían en los vehículos de tranvitrén.

Una vez más, se puede concluir que estos dispositivos pueden suponer una buena solución de futuro a la hora de desarrollar vehículos híbridos. Sin embargo, en la actualidad están aún en etapa de desarrollo y no parece que vayan a estar a punto para su utilización a corto plazo.

3.8. VEHÍCULOS CON PILAS DE COMBUSTIBLE

3.8.1. Funcionamiento de las pilas de combustible

Las pilas de combustible son unos dispositivos de conversión de energía electroquímica, con una eficiencia de conversión de combustible a potencia de dos a tres veces mayor que la de los motores de combustión interna [23].

En su funcionamiento, estos dispositivos utilizan combustible y oxígeno del aire, para producir electricidad, agua y calor. Si se utiliza hidrógeno como combustible, la única emisión resultante es agua. En la figura 6.15 se muestra la representación esquemática de una pila de combustible.

Sin embargo, dado que el hidrógeno puro es un material con un riesgo percibido muy alto, parece lógico suponer que los usuarios serían reacios a la utilización de este tipo de tecnología si se utilizase este gas como combustible directo, llevándolo almacenado dentro del vehículo. Es por ello que se hará necesaria la utilización de otros combustibles, hecho que conlleva la necesidad de disponer procesadores de combustible a bordo para convertir un combustible hidrocarburo, como metanol o gasolina, en un gas rico en H_2 para utilizarlo en la pila de combustible. Actualmente, la tecnología convencional consiste en transformar metanol, aunque la oxidación parcial de la gasolina a H_2 es atractiva porque la infraestructura de la gasolina ya existe.

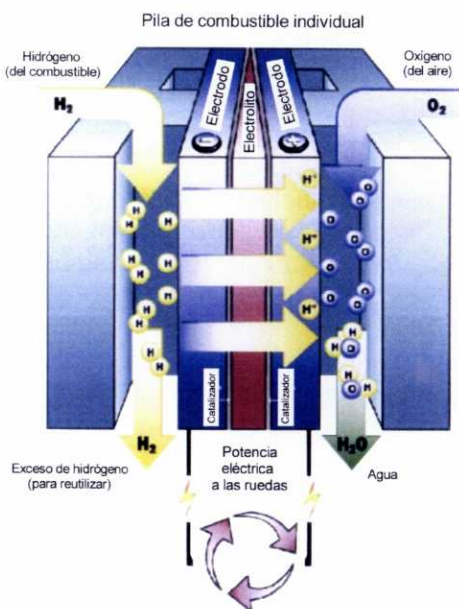


Figura 6.15: Esquema de una pila de combustible. Fuente: [16].

El hecho de transformar un combustible hidrocarburo hace que las emisiones ya no sean nulas, pero son considerablemente menores con respecto a las del motor de combustión interna.

3.8.2. Posibilidades de utilización de las pilas de combustible en la tracción de los vehículos ferroviarios

Las pilas de combustible plantean buenas características para las aplicaciones de transporte, ya que proporcionan un suministro de energía eléctrica continua a partir del combustible, con altos niveles de eficiencia y densidad de potencia. Además, ofrecen ciertas ventajas sobre los motores diesel, como son: menores emisiones; mínimo mantenimiento (debido a la ausencia de partes móviles); sistema de propulsión mucho más silencioso; y menores vibraciones experimentadas por los viajeros.

Sin embargo, aunque en la actualidad existen ya prototipos de autobús propulsados mediante pilas de combustible, que han mostrado su viabilidad, todavía no se ha desarrollado un vehículo ferroviario con este tipo de propulsión, aunque se está investigando sobre este tema, como se verá a continuación.

Efectivamente, existe un proyecto en Japón, en el RTRI (*Railway Technical Research Institute*), Instituto de Investigación Técnica Ferroviaria, que comenzó en el año 2001, y en el que se plantea el desarrollo de un vehículo ferroviario propul-

sado con pilas de combustible. Los combustibles que se plantean como opción en este proyecto son el hidrógeno puro, el gas natural licuado y el metanol. Uno de los retos que se plantean es demostrar la viabilidad de las pilas de combustible en usos cíclicos para un período de vida útil de 20 años o más.

Para el prototipo de vehículo planteado, la potencia total generada por las pilas de combustible deberá ser de 600 kW, y el vehículo deberá poder circular alrededor de 400 km al día con velocidades de hasta 120 km/h.

Por otra parte, en Estados Unidos se está tratando de desarrollar una locomotora de 109 toneladas, propulsada mediante pilas de combustible, dentro de un programa de cinco años de duración, con un presupuesto de 12 millones de dólares [12].

En la revista IRJ (*International Railway Journal*) de abril de 2000 [11] se decía que no se podría desarrollar un vehículo ferroviario con esta tecnología hasta aproximadamente el año 2008.

Con respecto a la industria ferroviaria, la empresa Alstom comenzó a estudiar las pilas de combustible en el año 1995, y en 1998 fundó la empresa Alstom Ballard, en colaboración con Ballard Power Systems, una empresa canadiense. La primera aplicación que pretende desarrollar Alstom es un vehículo de metro ligero, de tal manera que se evitará la necesidad de línea aérea en zona urbana, con todos los beneficios que este hecho conlleva (tanto económicos como ambientales). Varias ciudades francesas han expresado ya su interés por la implantación de un sistema de metro ligero con este tipo de propulsión [11].

Sin embargo, de nuevo esta tecnología parece tener un futuro prometedor, pero no está a punto a día de hoy, ya que todavía es mucho más cara que un sistema convencional, estando aún por resolver, además, el problema del almacenamiento del hidrógeno y de la ocupación de espacio que conlleva. Se debe encontrar el lugar adecuado para transportarlo sin tener que eliminar espacio de viajeros.

4. CONCLUSIONES PARA LA APLICACIÓN EN EL CASO FEVE

A la hora de determinar la solución más adecuada para el establecimiento de un sistema de tranvitrén sobre las líneas ferroviarias de FEVE se plantean las dos situaciones posibles:

- ☐ Caso de que las líneas de FEVE estén electrificadas: en este caso, se recomienda que el sistema de tranvitrén se proyecte en 1 500 V CC, tanto en la zona urbana como en la zona ferroviaria. De esta manera, el vehículo, preparado para recibir la tensión en 1 500 V CC, podrá circular normalmente tanto por el ámbito urbano como por el ámbito ferroviario.

Como ya se ha comentado en el apartado correspondiente, para la implantación del sistema de tranvitrén en 1 500 V CC en zona urbana es necesi-

rio el desarrollo de un reglamento que garantice el funcionamiento del sistema bajo esta tensión de forma segura.

- Caso de que las líneas de FEVE estén sin electrificar: en este caso se recomienda, en primer lugar, estudiar la rentabilidad de electrificación de estas líneas bajo tensión FEVE, de manera que si resultase rentable la solución sería la misma que en el supuesto anterior. En caso de que no resulte apropiado electrificar las líneas de FEVE se recomienda la utilización de un vehículo de tracción híbrida (diesel-eléctrica) que circule por las líneas ferroviarias convencionales propulsado por el grupo diesel.

Ni que decir tiene que en el momento en que las otras tecnologías citadas en el presente capítulo, como son las pilas de combustible o los supercondensadores, estén a punto para su utilización en el mundo ferroviario a un precio razonable, pueden convertirse en las opciones más apropiadas, añadiendo la ventaja de evitar el tendido de líneas aéreas. Sin embargo, en el momento actual estas tecnologías no se pueden plantear aún más que como opción de futuro.

REFERENCIAS

- [1] A.D., *Japan railfan magazine*, Vol. 38, 441, 1998, pp. 90-94.
- [2] AUSSCHUSS FÜR BAHNBAU, SCHIENENFAHRZEUG-AUSSCHUSS, *Einsatz von Stadtbahn-Fahrzeugen im Mischbetrieb nach BOStrab und EBO*, Köln: VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen), Julio 1995. (COMISIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE FERROCARRILES, COMISIÓN DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS, *Recomendaciones para la Operación de vehículos ferroviarios urbanos en explotación mixta conforme a BOStrab y a EBO*, Colonia: VDV (Asociación de Empresas de Transporte Alemanas), Julio 1995.
- [3] BRIGINSHAW, D., Wireless Light Rail Comes to Bordeaux, *International Railway Journal*, julio 2003, pp. 26-27. ISSN: 0744-5326.
- [4] BROWN, V., GOODYEAR, T., GRIFFIN, T., ROBEY, C., *Report Shared Track Standards*, Londres: junio 1993, Regional Railways, Network Southeast, British Rail Research.
- [5] BROWN, V., GOODYEAR, T., GRIFFIN, T., ROBEY, C., *Technical Report Shared Track Standards*, Londres: junio 1993, Regional Railways, Network Southeast, British Rail Research.
- [6] COMMUNAUTÉ URBAINE DE BORDEAUX, 1, 2, Tram! Magazine d'information de la Communauté Urbaine de Bordeaux, n° 8, pp. 2.
- [7] DRECHSLER, G., Light railway on conventional railway tracks in Karlsruhe, Germany, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, London, 2, 1996, pp. 81-87.
- [8] FEVE, *Informe anual*, Madrid: Dirección de Comunicación y Adjunta a la Presidencia de FEVE, Ediciones de los años 2000, 2001 y 2002.
- [9] HÉRISSÉ, Ph., Le tramway à la mode de Karlsruhe, *La Vie du Rail*, n° 2377, 7 de Enero 1993, pp. 12-20.
- [10] HONDIUS, H., What is light rail?. Its origin, today's state of the art and its importance throughout the world, *Railway Technical Review (RTR)*, 1, 1998, pp. 2-11.
- [11] IRJ, Fuel cell trains: a reality by 2008?, *International Railway Journal*, abril 2000, pp. 31-33. ISSN: 0744-5326
- [12] IRJ, Fuel cell loco in under development, *International Railway Journal*, septiembre 2003, pp. 2. ISSN: 0744-5326
- [13] KARR, M., HOHNECKER, *Mehrsystemkonzept der Schienenbahnen in Europa*, Karlsruhe: 1998, Institut für Strassen- und Eisenbahnwesen - Abteilung Eisenbahnwesen - Universität Karlsruhe (TH).
- [14] LUDWIG, D., BRAND, W., WALLOCHNY, F., GACHE, A., En matière de transports urbains et régionaux: Karlsruhe, un exemple à méditer..., *Chemins de Fer*, Paris, 422, 5/1993, pp. 8-16.
- [15] MEIBOM, P., *Technology Analysis of Public Transport Modes*, Rapport BYG-DTU R-022, Department of Civil Engineering, Kgs. Lyngby: 2001. ISBN: 87-7877-077-7.
- [16] OFFICE OF TRANSPORTATION TECHNOLOGIES, *Just the basics: Fuel cells*, Washington: Junio de 2001, US Department of Energy.

- [17] ORDÓÑEZ, J.L., Dossier sobre tranvías: Bilbao, Barcelona, Porto, Valencia y Alicante, nuevos tranvías en marcha en la Península Ibérica, *Vía Libre*, mayo 2002, nº 453. ISSN: 1134-1416.
- [18] ORTIZ, J., *Posibilidades para el desarrollo de energía en el transporte público ferroviario*, Madrid: noviembre de 2000, Siemens: División de Transporte.
- [19] SAFETY AND STANDARDS DIRECTORATE, *Guidance Note GE/GN-8502, Operation of Trams and Light Rail or Metro Vehicles Over Railtrack Controlled Infrastructure*, Londres: febrero 1999, Railtrack.
- [20] SCANRAIL CONSULT, DK, *Integrating local and regional rail, incl. cross-border aspects*, GROWTH Project GRD1-1999-10843 of FP5, 2001.
- [21] SIEMENS, Combino Nordhausen for Stadtwerke Nordhausen Verkehrs- und Stadtreinigungsbetrieb GmbH, Erlangen: septiembre 2002, Siemens.
- [22] SOULAS, C., Evolution of guided transport systems for urban and suburban applications, *World Congress on Railway Research 2001*, Köln, 25-29 noviembre 2001, UIC - Union Internationale des Chemins de Fer.
- [23] THOMAS, S., ZALBOWITZ, M., *Fuel Cells. Green Power*. Los Alamos, Nuevo México: 2000, Los Alamos National Laboratory.
- [24] WANSBEEK, C.J., Bordeaux: Fronting the French tramway revolution, *Tramways and Urban Transit*, diciembre de 2002, nº 780. ISSN: 1460-8324.

Capítulo 7

SISTEMAS DE SEGURIDAD Y COMUNICACIONES

I. INTRODUCCIÓN

El problema que se plantea deriva del hecho de que los sistemas cuya circulación se trata de compatibilizar (metro ligero y ferrocarril convencional) suelen utilizar diferentes sistemas de seguridad y comunicaciones. Además, las características de los vehículos que utilizarán las vías compartidas son diferentes en términos de masa, velocidad, aceleración y frenado, características todas ellas que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar la señalización y los sistemas de protección de las circulaciones.

Como es sabido, la característica fundamental en el diseño de los sistemas de señalización en el ferrocarril radica en la incapacidad de los vehículos ferroviarios convencionales para realizar una parada, desde la máxima velocidad, dentro de la distancia de visibilidad de una señal. Este hecho se debe a que, debido al peso y a la velocidad que estos vehículos alcanzan en sus recorridos, se llega a unos valores de energía cinética muy altos, siendo necesaria la disipación de la misma, durante el frenado, en forma de calor, por lo que se necesitan distancias de frenado grandes (que pueden ir de unos 500-800 m hasta valores de varios kilómetros para el caso de la alta velocidad). Por otra parte, la baja adherencia que se produce entre los carriles y las ruedas supone también un elemento desfavorable, limitando la capacidad de frenado de los trenes.

Es por ello que, en la señalización ferroviaria, se le debe dar al conductor con antelación la información sobre el estado de la vía por la que va a circular a continuación, estableciendo un sistema de conducción en “vista eléctrica”.

Por su parte, los vehículos de tipo metro ligero, debido a su menor peso y a las menores velocidades que alcanzan en sus recorridos, en la mayoría de los casos sí que podrán realizar una parada de emergencia desde la máxima velocidad permitida hasta la señal de detención dentro de la distancia de visibilidad. Además, y dado que este tipo de sistemas proceden del tranvía, que se explotaba en plataforma compartida, estos vehículos circulan normalmente en “marcha a la vista”, es decir, el conductor dirige el vehículo en función de lo que va apareciendo en su campo de visión, sin necesidad de disponer por anticipado de información sobre el estado de la vía en los siguientes kilómetros.

En este capítulo se precisarán los sistemas que se utilizan actualmente en las líneas de FEVE y en las explotaciones de metro ligero existentes en España, y se establecerán las medidas más apropiadas para que, en el caso de establecer un tranvitrén sobre las líneas de FEVE, la circulación del mismo se realice de la forma más segura posible. Sin embargo, dado que los sistemas de señalización y de radio que se utilizan en cada explotación suelen ser sistemas propietarios, de diseño específico adaptado a cada caso concreto, no se entrará a definir en detalle las características que debe tener cada uno, sino que se establecerán las condiciones mínimas que se deben exigir al fabricante y a las líneas para que el sistema funcione sin aumentar los riesgos potenciales para los usuarios.

2. SISTEMAS DE SEGURIDAD FERROVIARIOS CLÁSICOS

La seguridad ferroviaria se basa en dos conceptos fundamentales:

- ❑ Protección de un tren contra otro que le sigue o que circula en sentido contrario por la misma vía: para este tipo de protección se utilizan los sistemas de bloqueo.
- ❑ Protección de un tren contra un tren convergente en un cambio de agujas: para este tipo se utilizan los enclavamientos.

Así, el sistema de bloqueo consiste en dividir la vía en cantones (es decir, en tramos de vía protegidos por señales que autorizan o no la entrada de los vehículos en ellos). Cuanto mayor sea la longitud de un cantón peor es el sistema de explotación, puesto que tiene una menor capacidad de tráfico, dado que los trenes que circulen en el mismo sentido han de hacerlo de forma más separada.

El sistema de bloqueo más moderno es el Bloqueo Automático con Control de Tráfico Centralizado. El funcionamiento del sistema es el siguiente: en caso de que se trate de vía única, cuando un vehículo está autorizado a circular por un determinado cantón, todas las señales por delante en sentido opuesto a su marcha ordenan parada, mientras que la señal anterior en el sentido de la marcha indica parada, y la previa a ésta indica precaución. Cuando el vehículo sale de dicho cantón la señal anterior pasará a indicar anuncio de parada (por ejemplo, ámbar). Con el Control de Tráfico Centralizado la circulación se controla a distancia, desde la mesa de mando del puesto de control, de manera que una única persona es la encargada de abrir o cerrar señales, y establecer itinerarios por vía directa o desviada, para todas las estaciones y apeaderos del tramo en cuestión.

Por su parte, los enclavamientos son las relaciones de compatibilidad o incompatibilidad que se establecen entre dos o más palancas que accionen señales, agujas u otros aparatos de vía, al objeto de evitar maniobras peligrosas (adoptando el término palanca un sentido amplio, que puede referirse a una manilla, un pulsador, etc.). Los enclavamientos pueden ser mecánicos, electromecánicos o electrónicos.

El tipo de bloqueo y los enclavamientos que se utilizan en una determinada línea condicionan la señalización.

La señalización convencional ferroviaria de vía se establece mediante cartelones, dispositivos mecánicos (en desuso) y eléctricos. El sistema consiste en que el maquinista ve el aspecto de las señales dispuestas a lo largo de la vía y actúa en consecuencia, deteniendo el tren, aminorando la marcha o circulando normalmente.

Sin embargo, en la actualidad, para aumentar la seguridad de circulación evitando el fallo humano, se tiende a la utilización de sistemas de señalización en cabi-

na. En España se usa el sistema ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático), que está compuesto por balizas asociadas a las señales y al equipo del tren, que transmiten puntualmente a la cabina de conducción los aspectos que presentan las señales, de tal manera que el maquinista debe realizar las operaciones correspondientes a la indicación reconocida, es decir, confirmar, iniciar frenado, o no rebasar. En caso de que el maquinista no cumpla este requisito se inicia automáticamente el frenado de emergencia del tren. De esta forma, si el maquinista hace una interpretación incorrecta de una señal, el tren se detiene automáticamente, de manera que la seguridad no se ve afectada por la existencia de errores humanos.

3. EL CASO DE FEVE

En lo que se refiere a los sistemas de seguridad y comunicaciones utilizados en las líneas de FEVE se puede decir que en las líneas más importantes existe Bloqueo Automático (BAD, Bloqueo Automático en vía Doble, o BAU, Bloqueo Automático en vía Única) con CTC (Control de Tráfico Centralizado).

Todas las instalaciones bajo la responsabilidad del CTC están enclavadas, de forma que nunca se producen incompatibilidades. En el caso de FEVE los enclavamientos son fundamentalmente eléctricos y, últimamente, electrónicos, existiendo algunos eléctricos manuales y, en menor número, mecánicos. Los bloqueos automáticos cuentan con circuitos de vía en corriente alterna.

Además, se ha implantado ASFA en la mayor parte de las líneas, incluso con balizas asociadas a los pasos a nivel automáticos.

El hecho de que estos sistemas (de Bloqueo Automático con Control del Tráfico Centralizado y ASFA) se hayan implantado en las líneas más importantes de FEVE da a entender que se podrían extender su implantación a las líneas en que se desee establecer la explotación con tranvitrén. Pues bien, dado que, como se ha comentado en otros capítulos de esta Tesis, en dichas líneas será necesaria la potenciación de la seguridad activa, se parte de la base de la existencia de este tipo de sistemas en las mismas, teniendo en cuenta que en aquellas en que no estén implantados deberán disponerse antes de la puesta en marcha del nuevo sistema de tranvitrén.

4. SISTEMAS DE SEGURIDAD EN EXPLOTACIONES URBANAS DE METRO LIGERO

En lo que respecta a los sistemas de metro ligero, el equipamiento típico está constituido por sistemas antipatinaje (tracción) y antideslizamiento (frenado), comunicación por radio (tren-tierra), alarma de pasajeros que conecta con la cabina de conducción, y "hombre muerto". Como es sabido, el sistema de hombre muerto consiste en que el maquinista debe hacer, cada cierto tiempo, una acción

para confirmar su buen estado (por ejemplo, apretar un determinado pedal al oír una señal acústica), de tal manera que si sufre un desfallecimiento, o no se encuentra en la cabina de conducción, o se produce alguna otra eventualidad, al no realizar esta acción de confirmación el vehículo se detiene automáticamente.

En lo que se refiere a la señalización, para garantizar la regularidad y la alta velocidad media de los sistemas urbanos ligeros, se deberá actuar en dos sentidos:

- ☐ Por una parte, reserva de plataforma a lo largo del trazado de la vía, de manera que el sistema ligero no se vea afectado por la congestión existente en zona urbana.
- ☐ Por otra parte, dotar al sistema ligero de preferencia en los cruces cuando comparte la plataforma con el tráfico rodado. La forma de implantación de este sistema consiste en dotar al vehículo ligero con una baliza emisora, que desencadena una fase verde que permite al vehículo atravesar los cruces sin demora alguna, salvo en situaciones extraordinarias de colapso de tráfico, y en ciertos cruces de gran complejidad.

Por otra parte, los vehículos ligeros más modernos están dotados de sistemas ATP (*Automatic Train Protection*). El sistema ATP consiste en que el dispositivo de control del vehículo conoce la máxima velocidad con que puede circular en función del aspecto de las señales siguientes, y de la carga en ese momento dado, por lo que si el conductor del vehículo excede dicha velocidad, se producirá una aplicación automática de los frenos del vehículo.

5. RECOMENDACIONES PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANVITRÉN SOBRE LAS VÍAS DE FEVE

Dado que los sistemas de señalización y de radio que se utilizan en cada explotación suelen ser sistemas propietarios, de diseño específico adaptado a cada caso concreto, no se entrará a definir en detalle las características que debe tener cada uno, sino que se establecerán las condiciones mínimas que se deben exigir al fabricante y a las líneas para que el sistema funcione sin aumentar los riesgos potenciales para los usuarios.

Como ya se ha comentado en el capítulo referente a resistencia estructural, el planteamiento que se debe adoptar a la hora de implantar un sistema de tranvitrén sobre una determinada red ferroviaria, consiste en la potenciación de los sistemas de seguridad activa. Así, en lugar de considerar los graves daños que se producirían en caso de colisión de un ferrocarril convencional con un vehículo ligero, se debe tratar de disponer las medidas de seguridad adecuadas para reducir al mínimo razonable las posibilidades de que se produzca una colisión de este tipo. Debido a este motivo, no parece apropiado supeditar el nivel de seguridad a la confianza en la observación de las señales por parte del conductor,

dado que mediante este procedimiento no se obtendría una probabilidad de colisión suficientemente baja. Por tanto, será necesario establecer sistemas de protección adicionales, adecuados a las características de funcionamiento de los vehículos afectados (por ejemplo, sus prestaciones de frenado).

Así, como ya se ha comentado en el apartado anterior, para que el grado de seguridad sea el adecuado, el primer requisito que se debe establecer, referente a las líneas, consiste en que el sistema de tranvitrén sólo pueda circular por las líneas de FEVE que tienen los sistemas de señalización más avanzados, es decir, las que estén dotadas de bloqueo automático. Por ello, en caso de que se esté estudiando la implantación del tranvitrén en una línea que no lo tenga, se debe tener en cuenta que el primer paso, previo a la implantación del nuevo sistema, consistirá en dotar a la línea con dicho bloqueo.

Por otra parte, y ya en lo que se refiere a los sistemas de señalización y comunicaciones, los requisitos fundamentales que se deben cumplir son los siguientes:

- 1) Se debe establecer un sistema seguro de comunicación entre el conductor de cualquier vehículo que circule por las vías y el centro de control, tanto si se trata de un vehículo ferroviario convencional como si se trata de un vehículo de tranvitrén. Esta comunicación se debe garantizar tanto en explotación normal como de emergencia.
- 2) Todos los vehículos que circulen por una determinada vía deben ser capaces de reconocer la señalización de la misma y de comunicarse con el centro de control del tráfico.
- 3) Todos los vehículos que circulen por una determinada vía deben ser reconocibles por los dispositivos de control de vehículos instalados en la misma, de manera que en ningún caso pueda pasar desapercibida la presencia del vehículo para el sistema de control, garantizando así el bloqueo.

Para conseguir que se cumplan los dos primeros requisitos, la recomendación que se hace es duplicar en el vehículo de tranvitrén tanto el sistema de reconocimiento de la señalización como el sistema de radio, de tal manera que en el ámbito urbano utilice los sistemas propios de la red de metro ligero, mientras que en zona ferroviaria se adapte a los sistemas utilizados por el ferrocarril convencional.

Para la duplicación de la señalización, es importante destacar que la curva de frenado a utilizar no será la misma en los vehículos de tranvitrén que en los vehículos ferroviarios convencionales.

En lo que se refiere a la duplicación del sistema de radio, esta se debe realizar de tal forma que en el caso de que un encargado de la circulación quiera hacer una llamada de radio general a todos los vehículos, lo pueda hacer mediante una única acción. Asimismo, si un conductor quiere mandar una llamada de emer-

gencia al centro de control de la administración a la que pertenezca la línea por la que está circulando en ese momento, deberá poder hacerlo siempre mediante la misma consola dispuesta para este tipo de mensajes.

Como requisito adicional, la señalización de la línea se debe establecer de manera que se minimice la confusión de los conductores, dados los diferentes tipos de tráfico que utilizan cada ruta. Salvo que exista alguna circunstancia que lo desaconseje, se debe considerar un sistema en el que cada señal se aplique bien solamente al tranvitrén, o bien solamente al ferrocarril convencional, con cada tipo de señal identificada de forma distinta. Este precepto se aplica sólo a las señales de tipo cartelones (por ejemplo, los de limitación de velocidad), mientras que las señales de tipo semáforo se consideran apropiadas para que las puedan compartir los conductores de ambos sistemas, y su duplicación encarecería de forma considerable el sistema.

Esta opción de duplicación de ambos sistemas viene apoyada por las prescripciones de las normas alemana y británica sobre compatibilización (véanse las referencias [2, 5]).

Para realizar la duplicación, el fabricante deberá garantizar que no se producen interferencias entre los sistemas de señalización y de radio de cada ámbito, ya que en caso de fallo de dichos sistemas las consecuencias podrían ser catastróficas. Si es necesario, se establecerán unas limitaciones al valor máximo de la intensidad, en función de la frecuencia, para evitar fenómenos de este tipo. Este sistema es el adoptado por la norma alemana (véase la referencia [2]).

Para cumplir el tercer requisito, el fabricante deberá garantizar que los vehículos de los dos tipos son capaces de activar los sistemas de detección que se utilicen (es decir, que son capaces de shuntar, o bien de ser detectados por los dispositivos utilizados a tal efecto). Este tema tiene una importancia especial, ya que existen diversos factores que pueden tener un efecto adverso en el funcionamiento de los sistemas de detección de trenes, cuando se trata de vehículos ligeros circulando por vías ferroviarias convencionales. Estos factores pueden ser:

- ☐ El efecto de las pequeñas cargas por eje en la continuidad eléctrica rueda-carril.

Este factor, que podría constituir un problema en el caso de tratar de implantar el tranvitrén en otras líneas, no lo es en el caso de FEVE, como se verá a continuación con la comparación de pesos por eje de los vehículos de FEVE y de los de tranvitrén o metro ligero.

Así, si estudiamos las unidades eléctricas de transporte de pasajeros de FEVE, éstas tienen unas cargas por eje que van desde los 7 420 kg en el coche motor de las unidades 3 500, o los 7 750 kg en la serie 3 800, hasta los 5 086 kg en el remolque intermedio de la serie 3 500. Por su parte, el

coche motor Apolo, serie 2 400, tiene un peso por eje de 8 470 kg. Se debe tener en cuenta que todos estos valores responden a la tara, es decir, al tren sin carga.

Si se estudian estos valores referentes a los vehículos de metro ligero o de tranvitrén, se ve que el vehículo de Karlsruhe tiene una carga por eje del orden de 7 325 kg, el de Saarbrücken está en el entorno de los 6 925 kg, y el Avanto desarrollado por Siemens para el tranvitrén francés tiene del orden de 7 465 kg por eje. Ya en los sistemas de metro ligero, el Citadis de Alstom utilizado en Montpellier tiene un peso por eje de 6 300 kg por eje, mientras que el Combino está en el entorno de los 5 000 kg.

Por tanto, se ve que las cargas por eje de los vehículos de tranvitrén son del mismo orden que las de los vehículos ferroviarios convencionales utilizados en FEVE, por lo que no se espera que se produzcan problemas de continuidad eléctrica por este motivo.

- ❑ Cualquier característica constructiva, como la presencia de elementos elásticos en las ruedas, o la ausencia de un eje real en los diseños con ruedas independientes, que puede hacer necesaria la provisión de un equipamiento adicional para asegurar la continuidad eléctrica entre las bandas de rodadura.

En este caso, el diseño del vehículo de tranvitrén debe garantizar un enlace eléctrico continuo entre las ruedas y llantas de todo el vehículo.

- ❑ Influencia del perfil geométrico de la llanta de la rueda, incluyendo la geometría de la pestaña, en la continuidad eléctrica rueda-carril, y en la capacidad para accionar los contadores de ejes.
- ❑ El efecto de distancias entre ejes muy cortas o muy largas, que podrían causar errores de detección de los trenes.
- ❑ Si se van a utilizar sensores de presencia, se debe prestar atención a la capacidad de las ruedas para hacer funcionar a los detectores que activan el sistema.

En caso de que la detección del vehículo sobre la vía se realice por medio de circuitos de vía, los vehículos de tranvitrén deberán ir equipados con pinzas de cierre del circuito de vía para su uso en caso de descarrilamiento. Por otra parte, en caso de que existan dudas acerca del cierre adecuado del circuito de vía, se pueden utilizar dispositivos del tipo *Track Circuit Assister* (TCA), que consiste en un elemento que se sitúa en la parte baja del bogie, y que genera una corriente local por inducción electromagnética, de manera que se produce una corriente local que fluye a través del circuito carril-eje de ruedas.

Por otra parte, y debido a las ya comentadas catastróficas consecuencias que tendría una colisión entre un vehículo de tranvitrén y un vehículo ferroviario convencional, se deberá prestar especial atención a la evaluación de la forma de funcionamiento cuando los sistemas de protección y señalización tengan algún tipo de fallo, y se deberán establecer medidas de control adecuadas de manera que el riesgo asociado se reduzca al mínimo razonable.

REFERENCIAS

- [1] AEA TECHNOLOGY RAIL, *Track Circuit Assister - TCA*, Derby: AEA Technology Rail.
- [2] AUSSCHUSS FÜR BAHNBAU, SCHIENENFAHRZEUG-AUSSCHUSS, *Einsatz von Stadtbahn-Fahrzeugen im Mischbetrieb nach BOStrab und EBO*, Köln: VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen), julio 1995. (COMISIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE FERROCARRILES, COMISIÓN DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS, *Recomendaciones para la Operación de vehículos ferroviarios urbanos en explotación mixta conforme a BOStrab y a EBO*, Colonia: VDV (Asociación de Empresas de Transporte Alemanas), julio 1995.
- [3] GARCÍA DÍAZ-DE-VILLEGAS, J.M., *Ferrocarriles. Apuntes de clase*. Santander: Cátedra de Ferrocarriles de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, octubre 2001.
- [4] ORDÓÑEZ, J.L., Dossier sobre tranvías: Bilbao, Barcelona, Porto, Valencia y Alicante, nuevos tranvías en marcha en la Península Ibérica, *Vía Libre*, mayo 2002, nº 453. ISSN: 1134-1416.
- [5] SAFETY AND STANDARDS DIRECTORATE, *Guidance Note GE/GN-8502, Operation of Trams and Light Rail or Metro Vehicles Over Railtrack Controlled Infrastructure*, Londres: febrero 1999, Railtrack.
- [6] UITP LIGHT RAIL COMMITTEE, *Track sharing*, Montpellier: UITP (Union Internationale des Transports Publics), julio 2001.

Capítulo 8

ACCESO DE VIAJEROS

I. INTRODUCCIÓN

A la hora de implantar un sistema de tranvitrén en una determinada ciudad, es fundamental garantizar un acceso cómodo, rápido y seguro de los usuarios a los vehículos, sea cual fuere el tipo de estación en la que se realiza dicho acceso. De esta forma se conseguirá una mayor rapidez en el ascenso/descenso del vehículo, con el consiguiente ahorro de tiempo, de forma que el tiempo total de recorrido no se vea afectado en gran medida por la existencia de las paradas.

Sin embargo, a la hora de conseguir este objetivo se plantea el problema de que el vehículo de tranvitrén utilizará dos tipos de paradas, las ubicadas en zona urbana, y las ubicadas en las líneas ferroviarias.

Para el caso de las paradas urbanas, se pueden dar dos situaciones:

- ☐ Que la red urbana sea de nueva creación: en este caso las nuevas paradas en dicha zona se adaptarán a las necesidades del nuevo sistema, y se verán en este capítulo las opciones que se presentan.
- ☐ Que se aproveche una red urbana ya existente: en este caso las paradas urbanas estarán adaptadas al vehículo de metro ligero que las utilice, que tendrá unas características del tipo de las que se presentan en el apartado 2 del presente capítulo.

Para el caso de las estaciones ferroviarias se puede plantear, asimismo, dos opciones:

- ☐ Utilización de las mismas estaciones que los vehículos ferroviarios convencionales: en este caso se dar dos situaciones:
 - Utilización de los mismos andenes que los vehículos ferroviarios convencionales: este hecho dará lugar a unas distancias excesivas entre el vehículo y el andén.

Estas distancias excesivas se deben a las diferencias existentes en las alturas y distancias al eje de la vía de los andenes ferroviarios con respecto a los de las paradas de metro ligero, así como a las diferencias en el ancho de las cajas de los vehículos de metro ligero con respecto a los vehículos ferroviarios convencionales.

Si finalmente se opta por la utilización de los andenes ferroviarios, será necesario establecer algún modo de reducir estas distancias excesivas para facilitar el acceso de los viajeros.

- Utilización de nuevos andenes dispuestos específicamente para su utilización por parte de los vehículos de tranvitrén.

- ❑ Utilización de nuevas estaciones, en cuyo caso se deberá determinar el tipo de andenes que se van a utilizar en las mismas. Estos andenes deberán cumplir la condición de librar el gálibo de FEVE, para que no se produzcan problemas cuando los vehículos ferroviarios convencionales las atraviesen.

Para el caso de las estaciones ferroviarias habrá que resolver, por lo general, las dos situaciones. Esto se debe a que los vehículos de tranvitrén deberán servir, por una parte, a los principales núcleos de población en los que se sitúan las estaciones ferroviarias existentes, pero por otra, deberán crearse estaciones adicionales para dotar al sistema de una capacidad de captación de viajeros propia de un transporte metropolitano.

La solución para todas las posibles situaciones que se han planteado se reduce a solucionar el problema de salvar las distancias horizontales y verticales excesivas desde los vehículos a los distintos tipos de andenes de las redes que se van a utilizar. En el presente capítulo se estudiarán las posibles opciones que se presentan para el caso concreto de un sistema de tranvitrén utilizando las líneas de FEVE, y se tratará de determinar cuál de dichas soluciones es la más adecuada.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este apartado de planteamiento del problema se estudiarán los problemas que pueden aparecer cuando se trate de utilizar el andén existente en una estación de FEVE por parte de vehículos de tranvitrén. Para ello, se deben estudiar las dimensiones típicas de los vehículos y de los andenes en cada uno de los sistemas que se trata de compatibilizar. Estas dimensiones se presentan a continuación:

- ❑ Sistemas de metro ligero:
 - Ancho del vehículo: entre 2 300 y 2 650 mm. La tendencia actual en los vehículos de ancho de vía 1 435 mm es la utilización del mayor ancho de caja posible, es decir, de 2 650 mm. Sin embargo, en los sistemas de ancho de vía métrico se siguen utilizando valores de ancho de caja del orden de 2 400 mm. Este es el valor que se ha utilizado en los vehículos del tranvía de Valencia y de Bilbao.
 - Altura de andenes: entre 250 y 500 mm sobre el borde superior del carril, aunque con una marcada tendencia hacia los valores más bajos, debido a la imposición cada vez más generalizada de los vehículos de piso bajo, originada, por una parte, por consideraciones de accesibilidad para las personas de movilidad reducida, y por otra, por la mayor facilidad de integración de las paradas en el entorno urbano si se utilizan valores reducidos. Además de ello, la tendencia

a la utilización de vehículos de piso bajo parece favorecer la seguridad de los peatones, ya que el riesgo de arrollamiento es mucho menor.

Para el caso de Valencia y Bilbao se ha elegido una altura de piso de 350 mm, estando situado el andén, normalmente, a una altura de alrededor de 250 mm por encima del plano de rodadura (esta altura es del mismo orden de magnitud que la de los bordillos que se usan generalmente en las calles de las ciudades).

- Distancia del borde del andén al eje de la vía: depende, principalmente, del ancho del vehículo que se utilice en el sistema y del trazado en planta de la vía. Se puede tomar, como valor habitual para ancho de caja de 2 400 mm y vía recta, una distancia al eje de la vía de 1 250 mm, que se traduce en una distancia al borde activo del carril del orden de 750 mm. Este es el valor utilizado en el caso del tranvía de Bilbao.
- Sistemas de ferrocarril convencional FEVE:
- Ancho del vehículo: las unidades 3 500 y 3 800 de FEVE, que, como se ha comentado, son las más utilizadas, tienen un ancho de caja de 2 550 mm, es decir, 150 mm más anchas que la típica de los vehículos de metro ligero de ancho métrico. Por su parte, el gálibo estático establecido en las líneas de FEVE tiene un ancho en cintura del vehículo de 2 620 mm.
 - Altura de andenes: la altura de andén sobre el plano de rodadura del carril en las estaciones de FEVE es de 1 050 mm. Es decir, que el andén se situaría a una altura de 700 mm respecto al piso del vehículo de metro ligero que estuviese detenido en la estación.
 - Distancia del borde del andén al eje de la vía: para las estaciones situadas en vía recta (caso más común), el valor es de 1 400 mm de distancia al eje de la vía, que se traduce en 900 mm de distancia al borde activo del carril. Esta distancia es 150 mm mayor que para el caso de andén tranviario. En el caso excepcional en que la estación se sitúe en curva, la distancia al borde activo del carril puede llegar a valores del orden de 1 000 mm, en función del radio de curva y del peralte.

De los datos expuestos hasta el momento se deriva que los problemas que se plantearán, en relación con el acceso de viajeros, cuando un vehículo de tranvitrén utilice, en el mismo recorrido, las estaciones ferroviarias convencionales de FEVE y las paradas urbanas del sistema de metro ligero, serán los siguientes:

- Distancias horizontales excesivas entre el borde del vehículo y el del andén: como se ha mostrado anteriormente, cuando un vehículo ferroviario convencional de FEVE se detiene en una estación, la distancia desde el andén a la caja es de 125 mm (por su parte, la distancia al contorno de gálibo estático establecido en las líneas de FEVE sería de 90 mm). Ahora bien, si en esa misma estación se detuviese un vehículo de tranvitrén, con las dimensiones propias de un vehículo de metro ligero, la distancia pasaría a ser de 200 mm.

Esta distancia se encuentra, como se puede ver en el apartado 3.2 de este capítulo, dentro de los valores permitidos en la normativa británica para el caso de utilizar andenes ferroviarios existentes. Sin embargo, en dicha normativa se especifica que en puntos especialmente designados para el acceso de personas de movilidad reducida, dicha distancia debe reducirse a no más de 75 mm. Por tanto, y dado que en la actualidad se debe garantizar la posibilidad de acceso a todo sistema de transporte público por parte de las personas con movilidad reducida, se considerará éste el valor límite de distancia horizontal andén-vehículo en cualquier tipo de estación o parada que se vaya a utilizar.

Así, se ve que esta distancia no es aceptable para el acceso de personas de movilidad reducida. Pero incluso para el caso de personas sin impedimentos físicos dificultaría la entrada y salida de los viajeros en el vehículo, además de ser peligroso, dada la posibilidad de que los usuarios metan el pie en el hueco que queda entre el andén y el vehículo, con el consiguiente riesgo de accidentes. Por tanto, habrá que establecer algún tipo de solución a este inconveniente.

- Alturas de andén diferentes en función de la zona por la que se circule. Se ve claramente que si los vehículos de tranvitrén han de utilizar las estaciones ferroviarias convencionales de FEVE habrá que establecer algún sistema para solucionar la diferencia de 700 mm entre la altura de piso del vehículo de tranvitrén y el andén ferroviario.

En la figura 8.1 se presenta un esquema con las distancias que se han comentado, tanto en andén ferroviario como en parada urbana.

3. SOLUCIÓN ADOPTADA EN OTROS PAÍSES

3.1. NORMATIVA ALEMANA

Las recomendaciones de la VDV (*Verband Deutscher Verkehrsunternehmen*) para la operación de vehículos ferroviarios urbanos en explotación mixta conforme a BOStrab y EBO [1], establecen en su apartado 3.2, referente a gálibo y andenes, que las reducidas anchuras de los vehículos que cumplen la BOStrab (normativa que regula las explotaciones tranviarias), de 2,65 m de ancho máximo, hacen

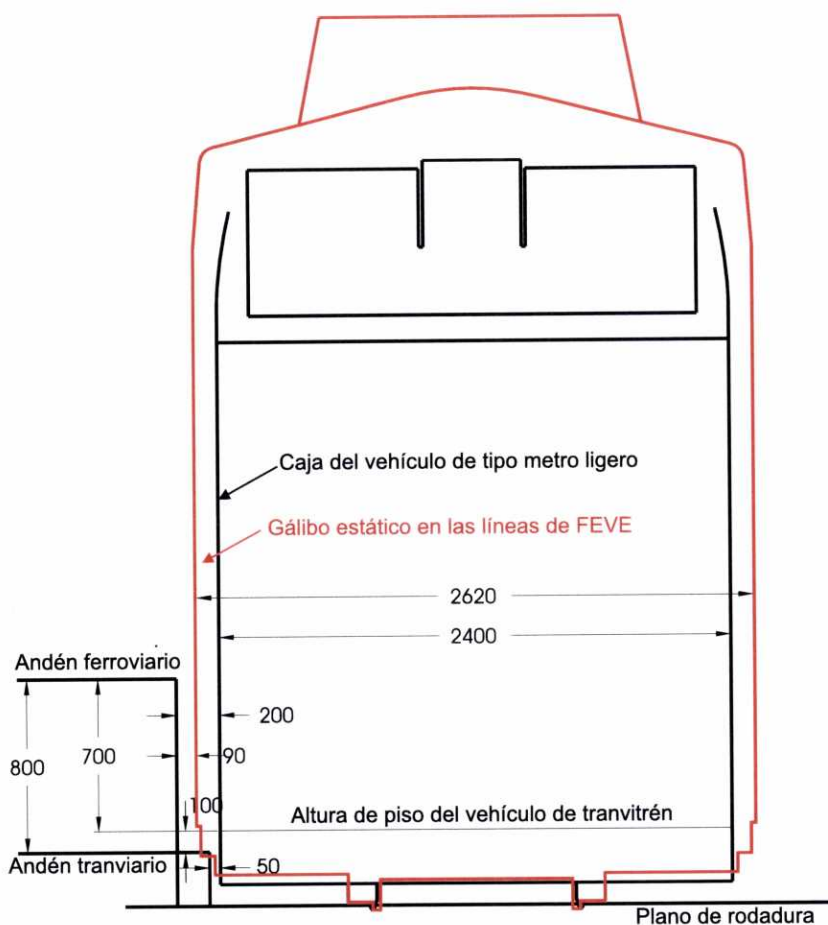


Figura 8.1: Distancias andén-vehículo en paradas urbanas y estaciones ferroviarias en recta.

que sea necesario realizar modificaciones en el vehículo o en el andén para poder mantener el perfil EBO (normativa que regula las explotaciones ferroviarias).

Con respecto a los andenes, se establece que, dado que en la red de ferrocarriles existen diferentes tipos de andén, con diferentes dimensiones, se deberá intentar por todos los medios la unificación de las alturas de los mismos para la puesta en servicio de un determinado tipo de vehículo de tranvitrén.

Las soluciones que se presentan como opción mediante actuaciones en el vehículo son las siguientes:

- ☐ Para el caso de que el vehículo de tranvitrén tenga un ancho de 2,65 m:
 - a) Altura de andén de 0,38 m: El espacio entre el vehículo y el andén se salvará mediante un peldaño abatible dispuesto en el vehículo.

Este tipo de andén ya se ha introducido en la explotación conjunta de Karlsruhe (cuya solución se puede ver en otros apartados de este capítulo). Con este diseño se puede utilizar un vehículo con altura de piso rebajada parcialmente.

- b) Altura de andén de 0,55 m: El espacio entre el vehículo y el andén se salvará mediante un peldaño abatible dispuesto en el vehículo.
 - c) Altura de andén de 0,76 o 0,96 m: Si se pueden construir andenes con la misma altura en toda la zona de puesta en servicio del vehículo, entonces es suficiente un peldaño abatible en el mismo para salvar la distancia. Si, por el contrario, el vehículo de metro ligero tiene paradas con un andén más bajo en la zona urbana, será necesaria la utilización de peldaños especiales, que salven tanto la distancia horizontal como la diferencia de altura en andenes bajos.
- ☐ Para el caso de vehículos de tranvitrén con un ancho entre 2,20 y 2,40 m: Se puede salvar el espacio entre el vehículo y el andén de la misma forma que para el caso anterior, sin embargo, debido a la gran distancia horizontal, de al menos 0,40 m, se recomienda realizar adaptaciones en el andén.

Las soluciones que se presentan como opción mediante actuaciones en las instalaciones son las siguientes, sujetas siempre a la obtención de autorizaciones especiales:

- ☐ Utilización, en la zona ferroviaria, de un andén de altura menor de 0,38 m, de tal manera que se puede acercar más al eje de la vía, librando aún así del gálibo EBO.
- ☐ Desplazamiento de la vía hacia el andén, para su utilización por parte del vehículo del tranvitrén: Esta solución requiere regulaciones especiales del sistema de señalización, para que cada vehículo circule por la vía que le corresponde. Se ha utilizado en Kassel, y se puede ver en más detalle en otro apartado de este capítulo.

3.2. NORMATIVA BRITÁNICA

Con respecto a los andenes bajos situados a lo largo de las líneas ferroviarias convencionales, la norma Railway Group Guidance Note GE/GN-8502 [8] establece lo siguiente:

“Los siguientes principios serán de aplicación a los andenes bajos en todos los casos:

- a) Deberán ser diseñados, contruidos, explotados y mantenidos de manera que se reduzca el riesgo hasta un punto razonable, consi-

derando todos los riesgos que se pueden producir en sus localizaciones específicas.

- b) El borde del andén se reconoce como una zona peligrosa, debiéndose identificar claramente como tal para el público, y se deberá proporcionar una plataforma con un ancho considerable, de manera que los usuarios no necesiten ocupar dicha zona salvo cuando suban o bajen al vehículo de metro ligero.
- c) Se deberá desmotivar la intrusión en las vías por todos los medios razonablemente posibles (...).
- d) Se deberán tomar medidas para evitar la confusión entre los pasajeros y que se comporten de una manera que pueda ponerlos en peligro por no ser conscientes de que están en una estación utilizada por vehículos ferroviarios convencionales.
- e) No se debe disponer ningún paso peatonal nuevo en las estaciones con vías compartidas a no ser que:
 - ☐ la operación de los vehículos ferroviarios convencionales esté confinada a la noche o a raras ocasiones, y se tomen unas disposiciones especiales para sacar a los viajeros de las estaciones con andén bajo en esos momentos, o
 - ☐ la seguridad esté garantizada por otros medios.
- f) No deberán usarse andenes bajos donde haya carriles conductores expuestos al contacto, que puedan suponer un peligro para los viajeros en los andenes o para las personas que invaden la vía.
- g) Los andenes bajos estarán normalmente supervisados mediante CCTV (*Closed Circuit TV* - Televisión en circuito cerrado), y se proporcionará un medio por el cual el operador de la estación pueda hacer algo, incluyendo avisos por megafonía, si se produce una situación de riesgo”.

Por su parte, el estudio “Normas para compartir vías de metro ligero y ferrocarril convencional”, llevado a cabo por British Rail Research [2], que fue la base para la redacción de la norma que se acaba de citar, establecía, en el apartado de Gálíbos, entre otras, las siguientes recomendaciones:

“ Las distancias entre los vehículos de tipo metro ligero y los andenes, para los sistemas de metro ligero en vías compartidas, deberán cumplir las normas establecidas en general para sistemas de metro ligero, en el RC&OR (*Railway Construction and Operating Requirements* - Normas para la Construcción y Explotación de Ferrocarriles). Los andenes deben proporcionar

un acceso a nivel, al menos a través de una de las puertas del metro ligero. Cualquier diferencia de nivel no deberá exceder, en ningún caso, de 35 mm. La distancia horizontal al perfil estático del vehículo no deberá ser mayor, normalmente, de 40 mm y, en vía recta y horizontal, no deberá exceder en ningún caso de 75 mm. Donde se utilicen los andenes existentes, la máxima distancia horizontal permitida es de 275 mm, pero en puntos especialmente designados para su uso por personas de movilidad reducida, dicha distancia debe reducirse a no más de 75 mm".

4. POSIBLES SOLUCIONES PARA EL CASO FEVE

Dado que los problemas referentes al acceso de viajeros se han planteado en dos vertientes, es decir, los relativos a la excesiva distancia horizontal entre el borde del vehículo y el andén, por una parte, y los relativos a las diferentes alturas de andén, por otra, se estudiarán también las posibles soluciones de manera independiente para cada uno de estos problemas, para, finalmente, estudiar el caso de que se presenten ambos problemas a la vez, que será el que se plantee a la hora de implantar un sistema de tranvitrén sobre las líneas de FEVE.

4.1. SOLUCIONES AL PROBLEMA DE DISTANCIAS HORIZONTALES EXCESIVAS

Las soluciones al problema de distancias horizontales excesivas se estudiarán, asimismo, en dos grupos diferenciados, que son:

- ☐ Soluciones por medio de la actuación en la infraestructura.
- ☐ Soluciones por medio de la actuación en los vehículos.

4.1.1. Soluciones mediante la actuación en la infraestructura

Como soluciones por medio de la actuación en la infraestructura se pueden plantear las siguientes:

- ☐ Desviar el eje de la línea que ha de tomar el vehículo de tranvitrén, de tal manera que se obtiene una sección de vía con cuatro o seis carriles en las zonas de estaciones, en función de que la desviación se realice para andén en un solo lado o en ambos.
- ☐ Establecer nuevas estaciones en paralelo a las ya existentes en las líneas ferroviarias convencionales que se van a utilizar, para dar servicio a los vehículos de tranvitrén que circulen por ellas, adaptándolas a las dimensiones de este tipo de vehículos, sin necesidad de cumplir con los gálibos de FEVE.

A continuación se discutirán estas opciones:

4.1.1.1. Sección con cuatro o seis carriles, de eje desviado

Esta opción consiste en desviar el eje de la línea en la zona de estaciones, acercándolo al borde del andén, quedando una sección de vía con cuatro o seis carriles, según que el andén esté a un lado o a ambos. De esta manera, el metro ligero toma esta vía desviada, y queda a una distancia apropiada del borde del andén, mientras que los vehículos ferroviarios convencionales mantienen su alineación y su distancia a dicho borde.

Esta solución se ha empleado en el tranvitrén de Kassel. En la figura 8.2 se presenta el esquema de la solución, tal y como aparece propuesto en la normativa alemana. En la figura 8.3 se puede apreciar un detalle de los aparatos de vía en las aproximaciones a las estaciones, mientras que en la figura 8.4 se presenta una vista de la sección de estación con seis carriles, para acercar el vehículo de metro ligero hacia los andenes de los dos lados.

La única ventaja que plantea esta solución radica en el hecho de que no es necesaria ninguna actuación en el vehículo, como la disposición de elementos especiales para paliar la distancia horizontal excesiva, que pueden ser origen de posteriores averías y problemas técnicos.

Sin embargo, este sistema adolece de inconvenientes de gran importancia, sobre todo para el caso de utilización de 6 carriles, como son:

- ☐ Por un lado, la gran complejidad de la infraestructura en la zona de estaciones, con diversos aparatos de vía, que tienen un coste de adquisición y mantenimiento. Este hecho se acentúa para el caso de utilización de 6 carriles, como se puede ver en la figura 8.4.
- ☐ Por otro lado, el hecho de que esta solución sólo resuelve el problema de distancias horizontales excesivas, pero no aporta ninguna mejoría ante el problema de diferentes alturas de andén.

Además, se debe tener en cuenta que, para el caso concreto que se estudia en esta Tesis, la distancia horizontal entre el andén y el vehículo de tranvitrén será de 200 mm. Por tanto, para alcanzar una distancia horizontal vehículo-andén de 75 mm, se debería desplazar el eje de la vía 125 mm. Pues bien, teniendo en cuenta que el patín del carril UIC-54 tiene un ancho de 140 mm, no habría espacio suficiente, con un desplazamiento de la vía de 125 mm, para los dos semipatines de los carriles. Es más, aunque se aumentase la desviación del eje de la vía hasta obtener una distancia horizontal vehículo-andén de 30 mm (desviando la vía en 170 mm), se obtendría una distancia entre los patines de los carriles contiguos de 30 mm, distancia que no es suficiente para la disposición de sistemas de sujeción normales, lo que daría lugar a la necesidad de utilizar algún sistema de diseño específico, que encarecería aún más la aplicación de esta solución.

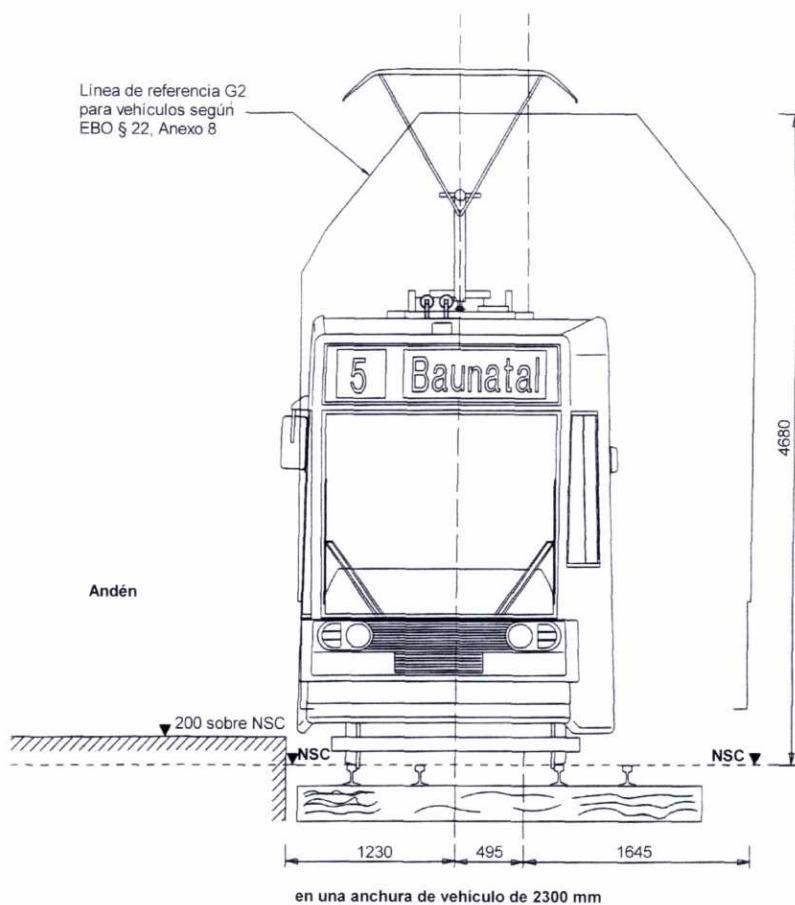


Figura 8.2: Sección con cuatro carriles en estación.
Fuente: [1].



Figura 8.3: Detalle de los aparatos de vía en aproximación a estaciones. Fuente: [5].



Figura 8.4: Detalle de sección de estación con seis carriles.
Fuente: [5].

Por tanto, y dados los inconvenientes planteados, esta solución queda descartada salvo que sea absolutamente imposible utilizar cualquiera de las otras que se presentan a lo largo de este capítulo.

4.1.1.2. Nuevas estaciones en paralelo

Esta solución consiste en que, en las zonas en que se quiera establecer una parada para los vehículos de tranvitrén, coincidiendo o no con zonas en que existan estaciones de FEVE, se saque una vía para dar servicio a un nuevo andén que será utilizado únicamente por los usuarios del metro ligero (véase la figura 8.5).

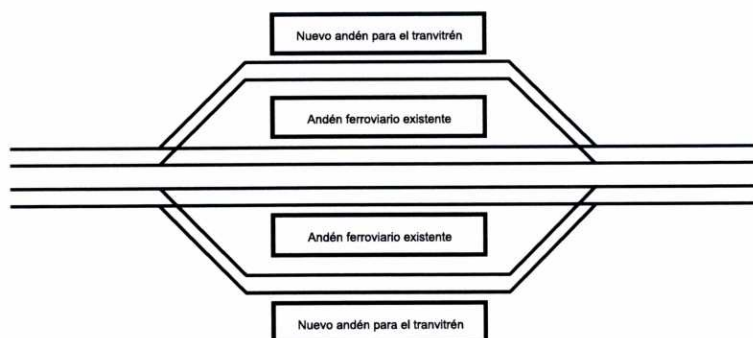


Figura 8.5: Disposición de nuevas estaciones en paralelo para el tranvitrén.

Como ventajas principales de este sistema destacan:

- ☐ por una parte, el hecho de que además de solucionarse el problema de distancia horizontal excesiva, se evitaría también, como se verá en el apartado correspondiente, el problema de diferentes alturas de andén
- ☐ por otra parte, con esta disposición se evita que por la parada de tranvitrén pasen vehículos ferroviarios convencionales que no se detengan, y que lleven una velocidad tal que pueda constituir un riesgo para las personas que estén en el andén, a la espera de que aparezca un vehículo de tranvitrén que se detenga.

Como inconvenientes principales se plantean los siguientes:

- ☐ La complejidad de la infraestructura en las zonas cercanas a las estaciones, en las que se deberían disponer varios desvíos, que tienen un mayor coste de adquisición y mantenimiento.
- ☐ La gran ocupación de espacio que puede suponer esta “duplicación” de las estaciones. Este espacio, en muchas ocasiones, puede no estar disponible. Por otra parte, puede que las obras necesarias no se puedan acometer con un coste razonable.
- ☐ El hecho de que la nueva infraestructura para el servicio de tranvitrén dificulta el acceso a los andenes del ferrocarril convencional, dado que será necesario atravesar la zona de parada del tranvitrén para llegar al andén ferroviario, lo que da lugar a riesgos adicionales para los viajeros del ferrocarril convencional.

4.1.2. Soluciones mediante la actuación en los vehículos de tranvitrén

4.1.2.1. Aumento del ancho de los vehículos de tranvitrén

Como se ha comentado anteriormente, el ancho de caja típico de los vehículos de metro ligero de ancho de vía métrico es del orden de 2 400 mm. Sin embargo, si se utilizasen vehículos de tranvitrén con el ancho típico de las unidades de ferrocarril convencional de FEVE, es decir, de 2 550 mm, se solucionaría el problema de la distancia horizontal excesiva entre el andén y el vehículo en las estaciones ferroviarias.

Esta solución no se puede plantear en el caso de que la red de metro ligero ya exista en la ciudad, dado que los vehículos ya estarán diseñados con un determinado ancho de caja, y resultaría complicado y costoso realizar la adaptación para el nuevo ancho, tanto en el material móvil existente, como en las infraestructuras (necesidad de retranqueo de andenes en paradas urbanas, etc.).

Sin embargo, en el caso de que el sistema de metro ligero sea de nueva creación, que será el más corriente para las líneas de FEVE, dado que en la mayoría de las ciudades a las que sirve esta compañía todavía no se ha desarrollado un sistema de metro ligero, resulta una solución muy apropiada.

Como inconvenientes a esta solución se podrían plantear los siguientes:

- ❑ Por una parte, podría alegarse una posible inestabilidad frente a vuelco de este tipo de vehículos, con una caja tan ancha para ancho de vía métrico. No obstante, los vehículos de FEVE tienen esta anchura, y no presentan problemas de este tipo, aún cuando su situación es más desfavorable debido a que tienen el centro de gravedad más alto que los vehículos de tranvitrén. Este hecho hace pensar que no se van a producir problemas de este tipo para el caso que se estudia.
- ❑ Por otra parte, se podría plantear el problema de que estos vehículos, con caja de 2 550 mm, son excesivamente anchos para las calles de la zona urbana. Sin embargo, esta objeción no parece muy justificada dado que el ancho típico de los vehículos de autobús es de 2 500 mm, e incluso los hay de mayor ancho. Por tanto, no debería existir ningún problema para que un vehículo de tranvitrén de 2 550 mm circule por estas calles, teniendo en cuenta, además, que dicho vehículo irá guiado mediante unos carriles, por lo que su invasión de la calzada estará más controlada.

Por tanto, se considera que esta solución es muy apropiada para el caso de explotaciones de metro ligero de nueva creación, dado que evita el problema de distancias horizontales excesivas, reduciéndose, por tanto, el problema de acceso de viajeros, a la resolución del caso de diferentes alturas de andén.

4.1.2.2. Plataformas retráctiles

En el caso de que el sistema de metro ligero ya exista, y, por tanto, no se pueda plantear la solución de aumento del ancho de la caja de los vehículos, se podría dotar a éstos con plataformas retráctiles que se desplieguen al abrir las puertas en la zona de vías compartidas. Se puede detectar esta zona en función, por ejemplo, de la alimentación eléctrica, o por la forma de control de la circulación, etc.

En el apartado anterior ya se hacía referencia al inconveniente principal de esta solución, que consiste en el hecho de que supone dotar al vehículo con dispositivos adicionales que requieren un mantenimiento y que son susceptibles de avería, debido al gran número de accionamientos que van a soportar durante su vida útil.

Sin embargo, a pesar de este inconveniente, esta solución es la que se ha adoptado en la ciudad alemana de Saarbrücken, cuyo dispositivo se puede ver representado en la figura 8.6.

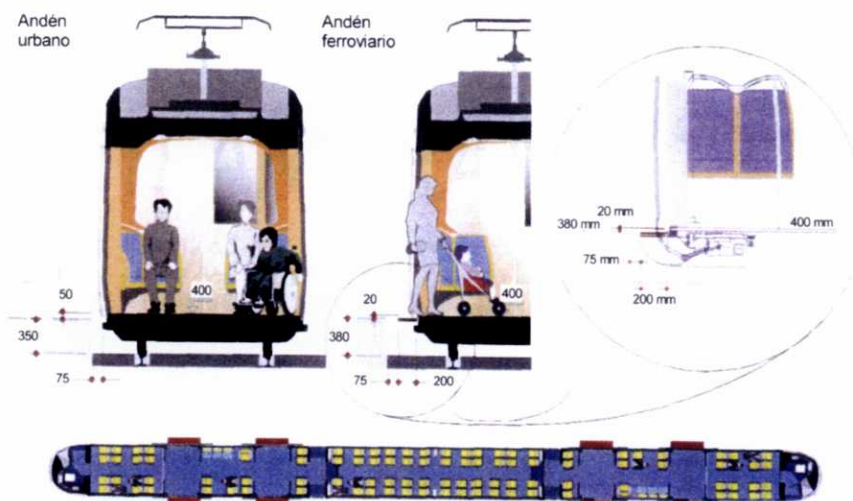


Figura 8.6: Dispositivo de entrada del vehículo de Saarbrücken.

Fuente: [9].

En la figura 8.7 se presenta, asimismo, la foto de un dispositivo de este tipo.

Como ventaja principal está el hecho de que si lo que se usa son peldaños retráctiles (como versión mejorada de las plataformas retráctiles) esta solución resolvería también el problema de la diferencia de alturas de los andenes. Esta última solución es la que se ha adoptado en la ciudad alemana de Karlsruhe.



Figura 8.7: Plataforma retráctil.

4.2. SOLUCIONES AL PROBLEMA DE ALTURAS DE ANDÉN DIFERENTES

La primera solución que se puede plantear ante este problema consistiría en que todos los andenes de las líneas por las que va a circular el mismo tipo de vehículo tuviesen la misma altura, con lo que el problema desaparecería.

Esta solución no es abordable en el caso de que el sistema de metro ligero ya exista, dado que tendrá una altura de andén adecuada al tipo de vehículos que operan en la red, y cambiarla supondría realizar una adaptación de toda la flota, con un coste desproporcionado.

Sin embargo, esta solución se podría plantear en el caso de un sistema de metro ligero de nueva creación, de tal manera que se utilizasen en el ámbito urbano

andenes de la misma altura que los de las líneas ferroviarias de FEVE. Para ejecutar esta solución se podría establecer una disposición de andenes similar a la que existe en las paradas de autobús en la ciudad de Curitiba (véanse las figuras 8.8 y 8.9).

Esta solución, que desde el punto de vista del sistema de transporte público es muy apropiada, ya que se elimina el problema de acceso a distinto nivel, tiene el gran inconveniente de que traslada dicho problema al ámbito urbano, provocando una serie de efectos negativos sobre el mismo, que se verán más abajo.

En efecto, la principal ventaja que tiene esta solución es que, aunque se produce una diferencia entre la altura de piso del vehículo y el nivel de la calle en el ámbito urbano, ésta no tiene que ser sorteada por los pasajeros en el momento de acceder al vehículo, sino antes o después, cuando se accede o se abandona la parada. Así, la diferencia de alturas no se traduce en una dificultad de acceso al vehículo en el momento en que éste está detenido en la parada, por lo que la capacidad del sistema no se ve afectada por este hecho.

Por otra parte, la propia parada se puede diseñar de tal forma que sea en ella en la que se realicen las labores de control de acceso, y venta de billetes, mediante la instalación de torniquetes de entrada y salida, de manera que ya no es necesario realizar este control a la entrada del vehículo, con el consiguiente ahorro de tiempo en las paradas.

Sin embargo, el inconveniente principal que tiene esta solución, que ya se avanzaba más arriba, se debe a sus importantes efectos negativos sobre el entorno urbano, como son:

- ❑ Las paradas en el ámbito urbano ocupan más espacio del que lo harían los andenes bajos, debido, por ejemplo, a la necesidad de disponer rampas para discapacitados
- ❑ Las paradas quedan separadas de los recorridos normales de los peatones, y crean efectos barrera para los mismos.



Figuras 8.8 y 8.9: Disposición de paradas del autobús de Curitiba.

- ❑ Además, estas paradas son difícilmente integrables dentro de la arquitectura urbana.

En la figura 8.10 se plantea una solución intermedia, con andenes escalonados, en la que parte de la diferencia de cotas se salva al acceder al andén, y otra parte al acceder al vehículo, de forma que la ocupación urbana no es tan grande. Sin embargo, esta solución adolece, aunque en menor medida, de los inconvenientes de la solución de Curitiba, así como de los inconvenientes del acceso de los viajeros a distinto nivel, que no se pueden aceptar hoy en día teniendo en cuenta los derechos de las personas con movilidad reducida.



Figura 8.10: Solución intermedia al acceso de viajeros.

Así, debido a estos efectos negativos sobre la ciudad, no se recomienda la utilización de este tipo de soluciones salvo en casos específicos en los que se disponga de mucho espacio y no se puedan utilizar otras de las planteadas en este capítulo.

4.2.1. Soluciones mediante la actuación en la infraestructura

Se presentan varias opciones para este tipo de soluciones, que se estudian a continuación:

- ❑ Utilización de andenes a doble altura
- ❑ Rebajar la cota de la vía en el ámbito urbano

4.2.1.1. Utilización de andenes a doble altura

Para la utilización de andenes a doble altura existen dos opciones:

- ❑ Colocarlos en serie, es decir, uno a continuación de otro a lo largo de la línea principal (véase la figura 8.11). De esta forma, el vehículo de tranvitrén se detendría en la zona de andén bajo, mientras que el vehículo ferroviario convencional se detendría en la zona de andén alto.

Estos andenes bajos a lo largo de las vías ferroviarias introducen una serie de riesgos adicionales, que es necesario considerar a la hora de plantear esta solución. Dichos riesgos son:

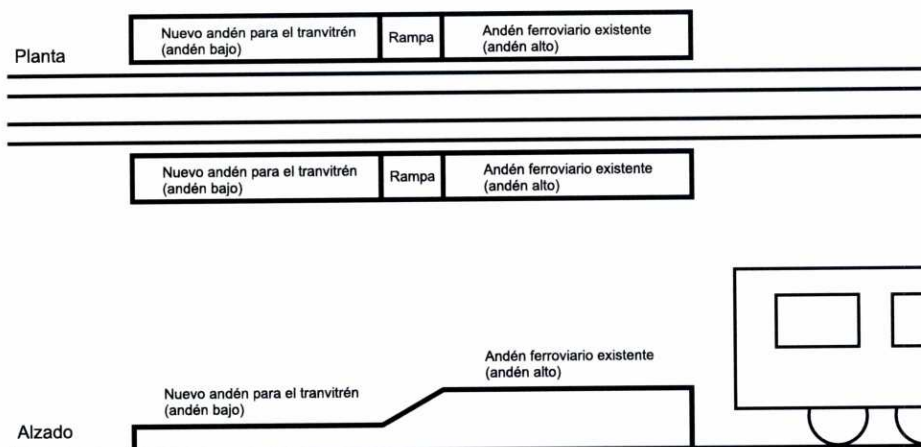


Figura 8.11: Disposición de nuevas estaciones en serie para el tranvitrén.

- Los andenes bajos facilitarán la intrusión en las vías, y los viajeros pueden creer que es seguro atravesarlas, ya que está permitido hacerlo en cualquier otro sitio de la ruta explotada mediante vehículos de tipo metro ligero.
- Los vehículos ferroviarios convencionales, al pasar a través de estaciones con andenes bajos, añadirán también nuevos riesgos que no se producirán en otras partes de la ruta explotada con vehículos de tranvitrén.
- Al colocar un andén bajo adyacente a las vías por las que circulan vehículos ferroviarios convencionales, éstos pueden sobresalir por encima del andén. Este hecho introduce un nuevo riesgo, que consiste en que las personas situadas en el borde del andén bajo pueden resultar heridas por el vehículo ferroviario convencional, y además aumenta el riesgo de que los viajeros sean barridos por el rebufo de dichos vehículos circulando a grandes velocidades.

Estos inconvenientes, a pesar de ser importantes, no invalidan esta solución, que puede resultar muy adecuada para solucionar el problema que se plantea. Simplemente, en el caso de adoptar finalmente esta solución, se deben tomar una serie de precauciones adicionales para garantizar la seguridad de los usuarios, como pueden ser:

- El lecho de la vía debe ser diseñado de tal manera que se haga difícil caminar por la línea.
- Los bordes de andén deben estar claramente identificado, con señales de advertencia espaciadas a lo largo de los mis-

mos, alertando al público del peligro de paso de trenes y recomendando la espera en la zona alejada del borde.

- Sistemas de aviso por megafonía acerca de la aproximación de trenes que no se vayan a detener en la estación.
- Colocación de vallas entre vías, de manera que los usuarios no se vean invitados a atravesar las vías para acceder al andén contrario.
- Disposición alternada de andenes, de manera que los usuarios no tengan motivos para cruzar las vías por zonas inapropiadas.

Se debe destacar que la solución de andenes bajos colocados en serie con los andenes existentes resuelve también el problema de distancias horizontales excesivas, siempre que la altura de piso del vehículo de tipo tranvitrén sea suficientemente bajo. Este hecho se debe a que, dado que el andén es bajo, se puede acercar más al eje de la vía, librando aún así el gálibo de FEVE, que en esas alturas con respecto a la cabeza del carril es más estrecho que en la zona de la cintura del vehículo (véase la figura 8.1). Se deberá realizar un estudio de la dinámica de la circulación de los vehículos de FEVE en cada punto en el que se pretenda establecer una nueva estación, al objeto de determinar cuál es la distancia mínima a la que se puede disponer el andén del tranvitrén con respecto al eje de la vía. Este estudio será del mismo tipo del que se realiza en el capítulo 10, referente al tema de gálibo, con los puntos de control correspondientes.

Por otra parte, ésta es la solución que se plantea para el establecimiento de las nuevas estaciones dentro de las líneas ferroviarias: situar un andén bajo a lo largo de dicha línea, teniendo en cuenta las precauciones que se han mencionado más arriba para evitar el riesgo de intrusión en las vías por parte de los usuarios.

- Colocarlos en paralelo, es decir, uno de ellos en una zona desviada de la línea principal (como se mostraba en la figura 8.5). Esta opción, así como sus ventajas e inconvenientes, ya se han comentado en el apartado de distancia horizontal excesiva.

Ambas opciones tienen el inconveniente de que suponen una ocupación de espacio mayor que las estaciones simples, y es posible que en las zonas de estación no exista espacio disponible para estas soluciones (sobre todo para el caso de colocación en paralelo).

4.2.1.2. Rebajar la cota de la vía en las paradas de ámbito urbano

Esta solución consiste en utilizar un vehículo de tranvitrén con altura de piso adaptada a la de FEVE, de manera que la utilización de las vías de dicho sistema no suponga un problema. Pero para no tener que establecer paradas en la ciu-

dad con una altura excesiva con respecto al nivel de la calle, la solución que se plantea es que se rebaje la cota de la vía en las zonas de paradas urbanas, de manera que aunque el andén esté a una altura del orden de 350 mm con respecto a la calzada, la altura sobre el nivel del carril sea bastante mayor debido a que la vía está hundida, y así se pueda acceder a nivel desde la parada al vehículo y viceversa.

Para el caso particular que se está resolviendo en esta Tesis la altura de los andenes de FEVE es de 1 050 mm sobre el nivel del carril, con lo que si se utiliza un andén de 350 mm en la zona urbana, se necesitaría rebajar la cota de la vía en la zona de paradas 700 mm. Si se considera que la pendiente de las rampas sea del orden de 40 ‰, la longitud de las mismas será de 17,5 m. En la figura 8.12 se presenta un esquema con esta solución.

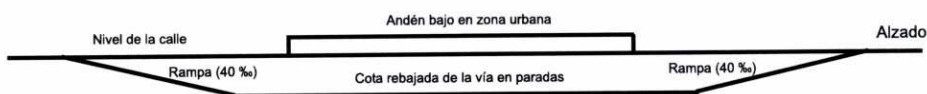


Figura 8.12: Rebaje de la cota de la vía en las paradas de la zona urbana.

Por tanto, con este sistema se introducen, en zona urbana, unos tramos a distinto nivel cuya longitud será, como mínimo, de 35 m más la longitud del andén.

El inconveniente de esta solución está en el hecho de que estas zonas de vía con cota rebajada suponen unas barreras importantes en el entorno urbano. Además, sólo se podrán disponer paradas en zonas del recorrido en las que no se comparta la plataforma con el resto de los vehículos.

4.2.2. Soluciones mediante la actuación en los vehículos de tranvitrén

Para este tipo de solución existen igualmente dos opciones, que se estudiarán a continuación:

- ☐ Escalones retráctiles que se adapten a las distintas alturas
- ☐ Acceso al vehículo a doble altura.

4.2.2.1. Escalones retráctiles

En esta solución el vehículo tiene unos dispositivos que, en función del tipo de estación de que se trate, se despliegan para paliar la diferencia de alturas entre el andén y el piso del vehículo (véanse las figuras 8.13, 8.14, 8.15 y 8.16).

Este sistema se utiliza en el tranvitrén de Karlsruhe, y tiene la ventaja adicional de que solventa igualmente la excesiva distancia horizontal entre la caja del vehículo y el andén.

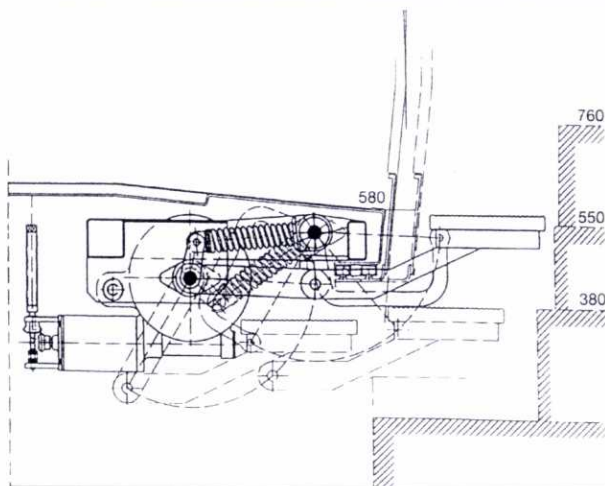


Figura 8.13: Esquema de funcionamiento escalones retráctiles. Fuente: [4].



Figura 8.14: Escalón retráctil desplegado en estación ferroviaria.



Figura 8.15: Escalón retráctil desplegado en parada urbana.



Figura 8.16: Detalle de escalón retráctil.

Como inconvenientes principales se deben citar, por una parte, el hecho de que es un mecanismo articulado que necesita un mantenimiento y que es susceptible de sufrir averías, al igual que sucedía con las plataformas retráctiles, y, por otra, el hecho de que la accesibilidad al vehículo se realiza mediante escalones, lo que ralentiza las operaciones de entrada y salida del mismo por parte de los pasajeros.

Este tipo de dispositivos se puede complicar más aún, considerando las necesidades de las personas con movilidad reducida, llegando a soluciones como la que se presenta en la figura 8.17, consistente en un sistema de peldaños que se puede convertir en un ascensor para sillas de ruedas. Como se puede imaginar, este sistema supone un problema en lo que se refiere al tiempo de servicio, ya que es necesaria una colocación inicial del dispositivo en la posición de carga, realizar posteriormente la carga, el ascenso o descenso, la descarga, y, finalmente, el repliegue final del mismo.



Figura 8.17: Ascensor de acceso a vehículo.

4.2.2.2. Acceso al vehículo a doble altura

El acceso al vehículo a doble altura se puede conseguir, utilizando un vehículo que esté dividido en zonas con diferente altura de piso, estando dotada cada una de ellas con sus correspondientes puertas, de manera que en función del tipo de estación en que se encuentre el vehículo se abran unas puertas u otras, realizándose siempre la entrada y salida del vehículo a nivel, independientemente del tipo de estación de la que se trate. La identificación del tipo de estación se puede realizar automáticamente en función de la tracción, del tipo de operación, o de cualquier otro sistema dispuesto a tal efecto.

Para permitir la circulación de unas zonas a otras del vehículo, se deberán disponer unos peldaños y unas rampas. Las rampas son necesarias para permitir la utilización del sistema por personas de movilidad reducida. Sin embargo, en el caso de diferencias grandes en la altura de unas zonas a las otras (como es el caso que se trata en esta Tesis, en el que se debe recordar que la diferencia de altura entre unos andenes y otros es de 700 mm), las rampas serían demasiado largas, por lo que ocuparían demasiado espacio en superficie e impedirían la disposición de un número de asientos adecuado. Por ello en estos casos se deberá contemplar su sustitución por sistemas de elevación automática, para dar servicio a las personas con movilidad reducida que accedan al vehículo en silla de ruedas. De esta forma, estas personas tendrán acceso a cualquiera de los

dos tipos de andenes, independientemente del tipo de estación en la que se hayan subido al vehículo.

Un esquema tipo del vehículo podría ser el que se presenta en las figuras 8.18, 8.19, 8.20 y 8.21.

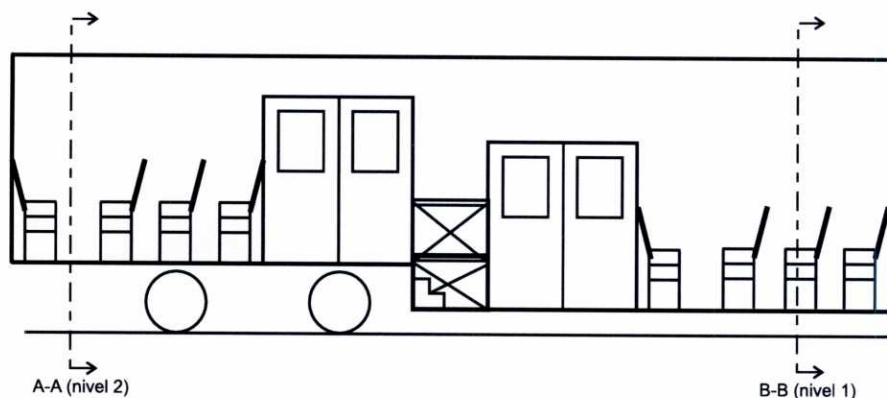


Figura 8.18: Vehículo a dos alturas. Longitudinal por pasillo central.

Fuente: [6].

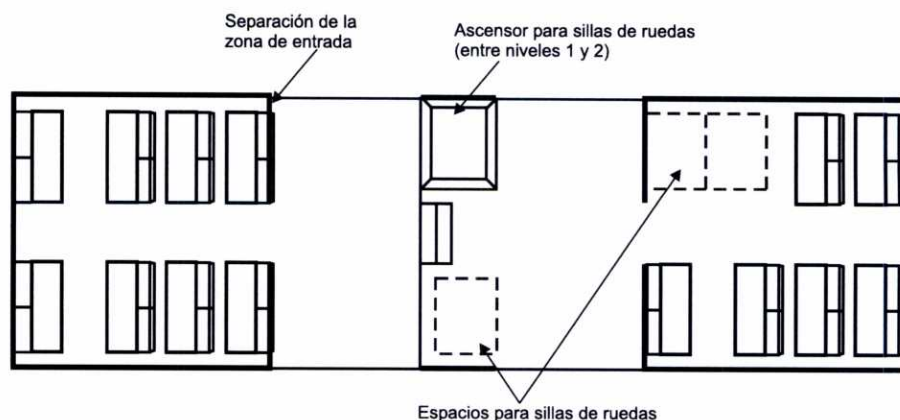
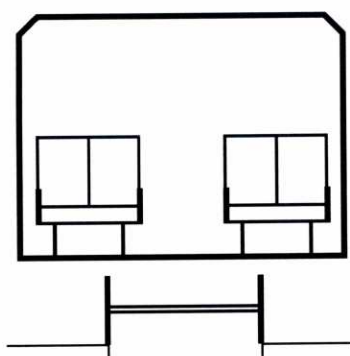


Figura 8.19: Vehículo a dos alturas. Planta.

Fuente: [6].

Como se puede apreciar en las figuras, se trata de un vehículo con una sección central de piso bajo (a la altura de piso del sistema de metro ligero), y unas secciones extremas de piso alto (a la altura de piso de los vehículos ferroviarios de FEVE). En cada una de estas secciones se pueden disponer una o más puertas.

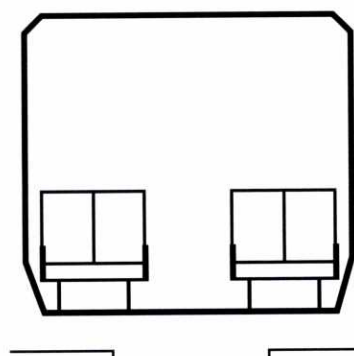
En la figura 8.19 se puede apreciar la situación de las escaleras y el ascensor, mientras que en las figuras 8.20 y 8.21 se presentan dos secciones del vehículo para apreciar la diferencia de altura de piso entre ellas.



Sección A-A

Figura 8.20: Vehículo a dos alturas. Sección AA.

Fuente: [6].



Sección B-B

Figura 8.21: Vehículo a dos alturas. Sección BB.

Fuente: [6].

La ventaja de este sistema es que en ambos tipos de estaciones se realiza el acceso al nivel del piso del vehículo. Esto es deseable porque así se consigue una mayor capacidad del sistema de transporte, necesiéndose menos tiempo de parada para que entre y salga la misma cantidad de viajeros.

El inconveniente está en la complejidad de diseño de estos vehículos de dos alturas, sobre todo si se tienen que dotar de ascensores para las personas en silla de ruedas, que son elementos susceptibles de sufrir averías, y con un mantenimiento complejo y costoso. Por otra parte, la necesidad de distintas puertas para acceder desde andenes altos y bajos, reduce el espacio disponible para asientos, ya que una puerta simple ocupa aproximadamente el mismo espacio en el lateral del vehículo que una fila de asientos.

4.3. SOLUCIONES A LOS DOS PROBLEMAS SIMULTÁNEAMENTE

En la tabla 8.1 se presenta un resumen de las soluciones que se han contemplado en este capítulo, haciendo hincapié en el tipo de problema que resuelven (distancia horizontal excesiva, distancia vertical excesiva, o ambos).

5. RECOMENDACIONES PARA EL CASO FEVE

En este caso la solución más apropiada no se puede determinar sin conocer exactamente la situación de las estaciones de la línea en cuestión, con sus condicionantes precisos, como disponibilidad de espacio, tipo de zona en que nos encontramos, etc. Sin embargo se establecen unas líneas generales de elección entre las distintas alternativas.

Tipo de solución	Problema resuelto	
	Distancia horizontal excesiva	Distancia vertical excesiva
Desvío eje vía	X	
Estaciones en paralelo	X	X
Aumento ancho vehículo	X	
Plataformas retráctiles	X	
Solución tipo Curitiba		X
Andén a doble altura, serie	X	X
Rebaje cota de la vía		X
Escalones retráctiles	X	X
Acceso al vehículo a doble altura		X

Tabla 8.1: Recopilación de soluciones planteadas.

En principio, para el caso de que la red urbana sea de nueva creación, se recomienda la utilización de vehículos de tranvitrén en el ancho de los vehículos ferroviarios convencionales de FEVE, es decir, de 2 550 mm de ancho de caja, consiguiéndose así mayor capacidad de los vehículos, y mayor confort y amplitud para los viajeros. Con respecto a la altura de piso, se recomienda la utilización de vehículos de tranvitrén de piso bajo, que es la tendencia actual en las nuevas redes, debido a sus diversas ventajas, como son:

- ☐ Facilidad de integración de los andenes en la zona urbana.
- ☐ Facilidad de acceso para las personas de movilidad reducida y para el público en general.
- ☐ Mayor aceptación de este tipo de vehículos por parte de los usuarios.

Establecida así la red urbana de nueva creación, se recomienda solucionar el problema de acceso de viajeros en las estaciones ferroviarias primitivas mediante la disposición de andenes bajos situados en serie con los ya existentes. Para ello, puede ser necesario cambiar en cierta medida la disposición de las vías en las estaciones, ampliando la zona libre de aparatos de vía contigua a los andenes. En cualquier caso, esta parece la solución más adecuada en caso de que no existan problemas insalvables de espacio.

Ésta es también la solución que se recomienda para el caso de red urbana ya existente. Como se ha comentado anteriormente, con los andenes bajos dispuestos en serie se solucionará también el problema de distancias horizontales excesivas, aunque es necesaria la realización de estudios específicos para determinar la distancia mínima a la que se pueden disponer los andenes con respecto al eje de la vía, en función de la dinámica de circulación de los vehículos de FEVE por el tramo concreto en que se disponga la estación.

Para la utilización de estos andenes bajos en serie, se deberán tomar una o varias de las precauciones establecidas en el apartado 4.2.1.1 para evitar el riesgo de intrusión de las vías por parte de los usuarios.

En caso de que la red urbana existente utilice vehículos de piso alto, o de que la red urbana de nueva creación, por motivos particulares (como, por ejemplo, que se vayan a aprovechar un gran número de estaciones existentes de FEVE), utilice este tipo de vehículos, se resuelve el problema de utilización de las estaciones existentes de FEVE, pero se crea el nuevo problema acceso al vehículo en la zona urbana. La recomendación, en este caso, es la de utilizar escalones retráctiles en el vehículo, disponiendo paradas de andén bajo en la ciudad. Si esto no es posible, se deberán adoptar paradas con andén alto, o bien con rebaje de la cota de la vía en la ciudad, con los problemas de integración urbana que ya se han comentado para estas soluciones.

Finalmente, para el caso de las estaciones de nueva creación en la zona ferroviaria, se recomienda, en caso de vehículo de piso bajo, la utilización de andenes bajos a lo largo de la vía, como ya se ha comentado más arriba.

REFERENCIAS

- [1] AUSSCHUSS FÜR BAHNBAU, SCHIENENFAHRZEUG-AUSSCHUSS, *Einsatz von Stadtbahn-Fahrzeugen im Mischbetrieb nach BOStrab und EBO*, Köln: VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen), julio 1995. (COMISIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE FERROCARRILES, COMISIÓN DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS, *Recomendaciones para la Operación de vehículos ferroviarios urbanos en explotación mixta conforme a BOStrab y a EBO*, Colonia: VDV (Asociación de Empresas de Transporte Alemanas), julio 1995.
- [2] BROWN, V., GOODYEAR, T., GRIFFIN, T., ROBEY, C., *Report Shared Track Standards*, Londres: junio 1993, Regional Railways, Network Southeast, British Rail Research.
- [3] EUROPEAN COMMUNITY, *SAFETRAM: Passive Safety of Tramways for Europe. Mid-Term Report*, Bruselas: Competitive and Sustainable Growth Programme, European Community, enero de 2003.
- [4] HONDIUS, H., What is light rail?. Its origin, today's state of the art and its importance throughout the world, *Railway Technical Review (RTR)*, 1, 1998, pp. 2-11.
- [5] KLEE, W., Eine (neue) Klasse für sich, *Strassenbahn*, 2001, n° 9, pp. 35-39.
- [6] MORLOK, E.K., *Entranceway and car body design: EBD 2.1 - an integrated railcar design for mixed high level (including mini-HL) and low level platform lines that meets both ADA accessibility requirements and freight service clearance requirements*, Mayo de 2002, Universidad de Pensilvania.
- [7] MORLOK, E.K., *EBD 1.1 - a new railroad commuter car entranceway design for mixed high and low level platforms*, Abril de 2002, Universidad de Pensilvania.
- [8] SAFETY AND STANDARDS DIRECTORATE, *Guidance Note GE/GN-8502, Operation of Trams and Light Rail or Metro Vehicles Over Railtrack Controlled Infrastructure*, Londres: febrero 1999, Railtrack.
- [9] VEINNANT, B., CACCIAGUERRA, F., Un tram-train nommé succès: l'exemple de Sarrebruck, *Revue Générale des Chemins de Fer*, París, 1998, 11-12, pp. 35-42. ISSN: 0035-3183

Capítulo 9

PERFIL DE LLANTA

I. INTRODUCCIÓN

El problema que se plantea en relación con el perfil de llanta deriva, fundamentalmente, de los siguientes hechos:

- ❑ Por una parte, el diámetro de las ruedas utilizadas por los vehículos de metro ligero es, en general, menor que el utilizado en los vehículos ferroviarios convencionales.

Así, los diámetros típicos ferroviarios se encuentran en el entorno de los 800 a 1 000 mm para llantas nuevas, siendo, en el caso de FEVE, de 850 mm.

Sin embargo, los diámetros típicos para vehículos de metro ligero se encuentran, normalmente, entre 500 y 750 mm, llegando incluso, en casos extremos de vehículos de piso bajo, a valores de 375 mm. En el caso del tranvía de Bilbao, el diámetro de las llantas nuevas es de 590 mm [31].

Estas diferencias de diámetro pueden dar lugar, como se verá más abajo, a problemas de guiado al circular los vehículos de metro ligero sobre los aparatos de vía de las líneas ferroviarias convencionales.

- ❑ Por otra parte, las pestañas de los vehículos de metro ligero suelen ser más estrechas y de menor altura que las de los vehículos ferroviarios convencionales. Este hecho se debe a la necesidad de disponer, en zona urbana, de carriles tranviarios con gargantas estrechas y no muy profundas, para no ocasionar problemas importantes a los demás usuarios de las calles (peatones, bicicletas, motos, etc.).

En las figuras 9.1 y 9.2 se muestran los perfiles de llanta de FEVE (en concreto, el perfil recogido en la norma UNE 25102 [11]) y del tranvía de Bilbao, que se utilizarán como perfiles de partida para los estudios que se van a llevar a cabo a lo largo de este capítulo.

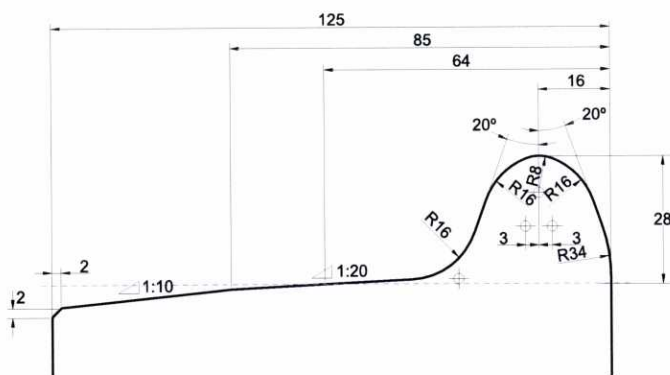


Figura 9.1: Perfil de rueda UNE 25102.

Fuente: [11].

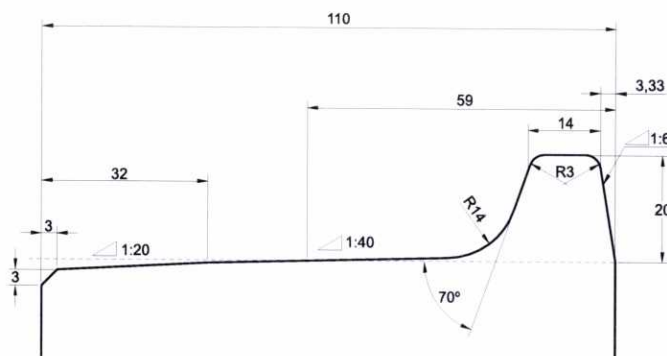


Figura 9.2: Perfil de rueda del tranvía de Bilbao.

- Asimismo, la superestructura de los sistemas de tranvía y metro ligero suele contar con carriles de garganta, embebidos en el pavimento de la calzada, y colocados generalmente verticales, mientras que los sistemas ferroviarios convencionales utilizan carril de patín con cierta inclinación.

En concreto, para el caso de FEVE, se utiliza, en obra nueva, traviesa de hormigón monobloque con sujeción HM, carril UIC-54 en barra larga soldada inclinado 1:20 hacia el interior, y balasto silíceo de tipo 1 o 2.

Para el caso del tranvía de Bilbao se utiliza, en la mayor parte de su trazado, carril Ri60 embebido en elastómero, sobre placa de hormigón, y rematado con una capa de adoquín.

En las figuras 9.3 y 9.4 se pueden ver las superestructuras típicas de las líneas de FEVE y del tranvía de Bilbao.

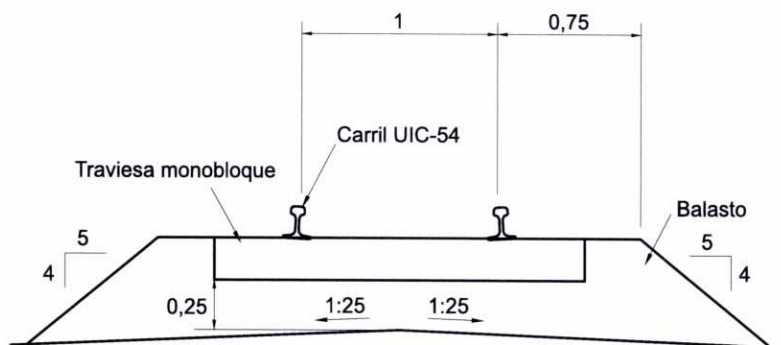


Figura 9.3: Superestructura de la vía de FEVE.

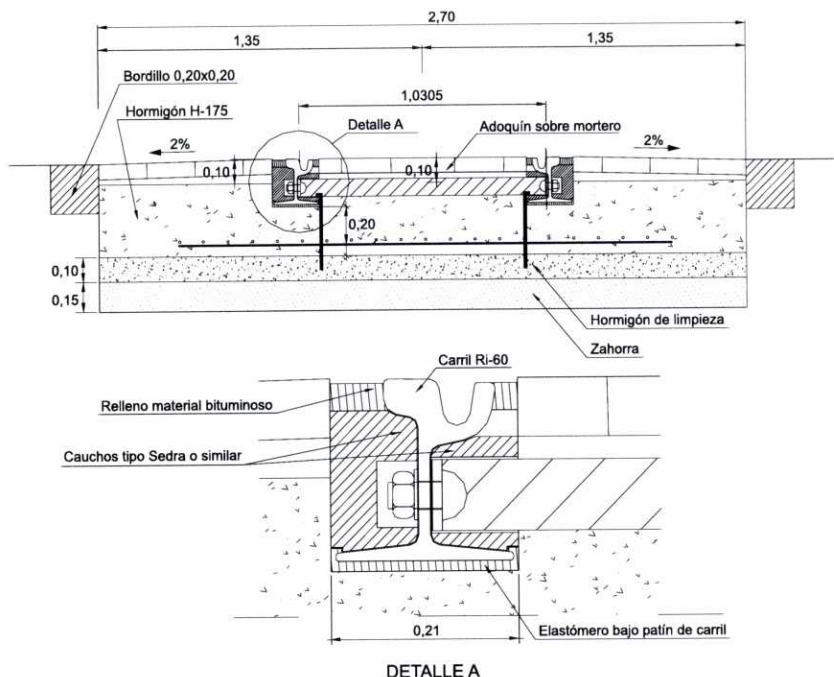


Figura 9.4: Superestructura tranvía de Bilbao.

Debido a estas diferencias, cuando se plantea la circulación de un vehículo de tipo metro ligero sobre vías ferroviarias convencionales, es posible que aparezcan ciertos problemas, como son los siguientes:

- ❑ Problemas dinámicos: Se pueden producir perturbaciones en la marcha normal de los vehículos, que pueden dar lugar a problemas de desgastes localizados, pérdida de confort, e incluso de inestabilidad del propio vehículo, pudiendo llegar a producirse su descarrilamiento.
- ❑ Problemas de guiado: Cuando una rueda de tipo tranviario, con pequeño diámetro y con pestaña estrecha, circula sobre los aparatos de vía de una línea ferroviaria convencional, y en particular, sobre la laguna del corazón de dichos aparatos, se pueden producir problemas de guiado, básicamente por dos motivos:
 - por una parte, porque esta laguna suele ser más larga que en los aparatos de vía tranviarios, lo que puede originar pérdidas de apoyo e impactos cuando se circula sobre el cruzamiento con ruedas de radio reducido, como las tranviarias;
 - por otra parte, porque la cota de protección de la punta del corazón puede ser excesiva (de tal manera que el contracarril opuesto a la punta del corazón se sitúe a una distancia del carril que permita a la

pestaña de la rueda opuesta tropezar con la punta del corazón e incluso introducir la rueda en la vía para la que el cambio no está dispuesto). En las figuras 9.5 y 9.6 se muestran la sección y la planta del paso de un eje montado por el corazón de un desvío, indicando, en la planta, los problemas de compatibilidad geométrica que se pueden presentar.

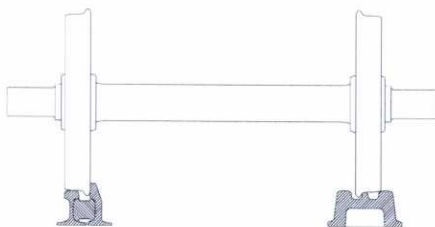


Figura 9.5: Sección de paso por corazón de desvío. Fuente: [18].

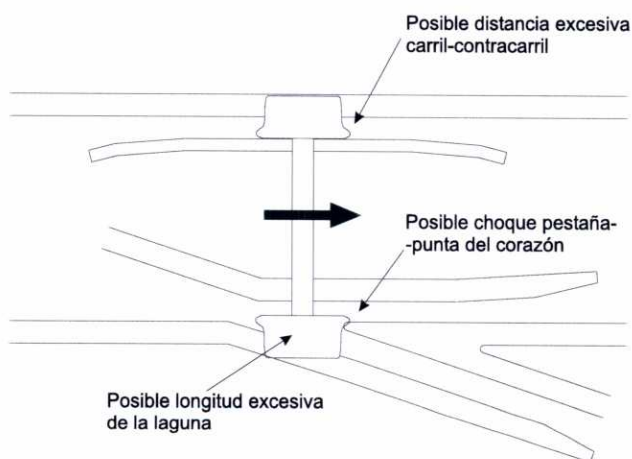


Figura 9.6: Planta de paso de eje montado por corazón de desvío. Fuente: [18].

Por otra parte, el planteamiento de soluciones para estos problemas va a depender de las condiciones de partida para la implantación del sistema de tranvitrén, en las que se pueden dar dos situaciones diferentes, a saber:

□ Caso de sistema tranviario de nueva implantación:

Se puede dar el caso de que, en el momento en que se plantea la implantación de un sistema de tranvitrén en una determinada ciudad, todavía no existan en la misma líneas de metro ligero. Es decir, que se plantea, desde la concepción del sistema, un metro ligero que va a utilizar tanto vías tranviarias (de nueva creación), como vías ferroviarias que ya existen en el entorno de la ciudad.

En ese caso, dado que las líneas tranviarias todavía no existen, no es necesario llegar a una solución de compromiso entre el sistema tranviario y ferroviario, sino que se pueden construir las líneas urbanas con ciertas adaptaciones, al objeto de facilitar la circulación mixta.

Así, se puede utilizar, por ejemplo, en el tendido de las vías urbanas, un carril de garganta ancha, de manera que puedan circular sobre él perfiles de llanta con pestaña ancha, típicamente ferroviarios. De esta forma los vehículos de tranvitrén pueden ir equipados con llantas ferroviarias estándar, reduciéndose así los problemas de compatibilidad entre las distintas circulaciones.

Esta es la situación que se da en el caso de Saarbrücken, cuya solución se presenta más abajo.

Es importante destacar que ésta puede ser la situación de partida en muchas ciudades españolas, que aún no cuentan con sistemas de metro ligero, pero que están estudiando las posibilidades de implantación. En estos casos la opción de utilización de líneas ferroviarias existentes, con las ventajas que ello conlleva, puede ser un incentivo adicional.

☐ Caso de sistema tranviario existente:

En el caso de que, en el momento de la implantación del sistema de tranvitrén, las líneas tranviarias ya existan, será necesario estudiar los perfiles de las llantas y de los carriles de las redes ferroviarias y tranviarias a utilizar, y establecer una solución de compromiso para cumplir con los condicionantes de ambas. Este es el caso de Karlsruhe, en Alemania, cuya solución se presenta más abajo, y podría ser también el caso de las ciudades españolas que, estando dotadas de un sistema tranviario, se planteen la ampliación mediante la tecnología de tranvitrén.

2. SOLUCIÓN ADOPTADA EN OTROS PAÍSES

En los países en que se han implantado o se van a implantar sistemas de tranvitrén, se han encontrado igualmente con el problema del perfil de llanta. Si bien es verdad que cada país tiene unos perfiles de llanta y carril tranviarios y ferroviarios distintos, la filosofía del problema planteado es básicamente la misma, por lo que las soluciones empleadas podrán dar ciertas ideas para la resolución del caso que se trata en esta Tesis.

2.1. ALEMANIA

2.1.1. Karlsruhe

En el caso de Karlsruhe, como ya se ha comentado en otros capítulos de esta Tesis, se prolongaron los servicios de un sistema de metro ligero ya existente a lo largo de ciertas vías de la red ferroviaria convencional, pertenecientes a la DB (*Deutsche Bahn*).

Las vías de la DB son vías convencionales, equipadas con carril Vignole S49, con un peso por metro lineal de 49,43 kg/m. En este tipo de carril, la tabla de rodadura se une a los flancos de la cabeza del carril con una curva de acuerdo de 13 mm de radio, idéntica a la de los carriles alemanes de garganta Ri 59N. Las dimensiones de estos carriles se muestran en la figura 9.7 [29].

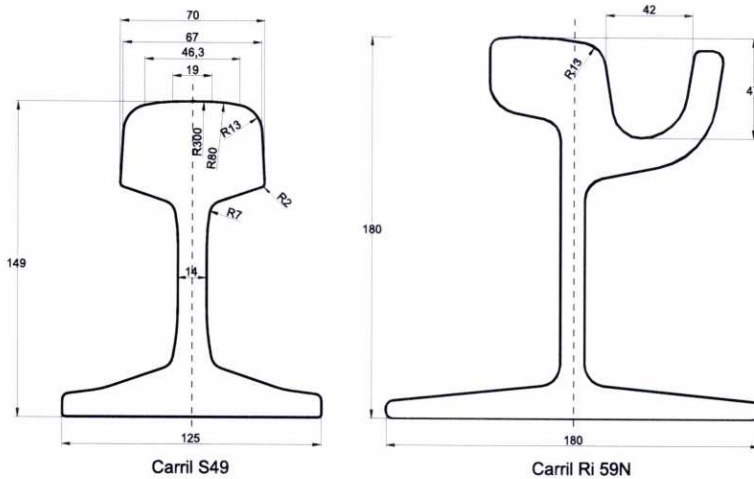


Figura 9.7: Carriles S49 y Ri 59N alemanes.

Fuente: [23].

Todas las ruedas de Karlsruhe tienen las tablas de rodadura unidas igualmente a la pestaña por una curva de acuerdo de 13 mm de radio, de manera que el guiado es adecuado en todos los casos [29].

Para solucionar los problemas de guiado al paso por la laguna del corazón de los aparatos de vía, utilizaron un perfil de llanta especial (que se presenta en la figura 9.8), combinado con la utilización de contracarriles elevados. El funcionamiento en la circulación sobre los aparatos de vía es el siguiente:

- ❑ La llanta, de 135 mm de ancho, tiene un resguardo de 8 mm sobre la cota interna de la rueda, que asegura el guiado por el contracarril antes de que la pestaña se ponga en contacto con él, y mantiene así convenientemente orientada la pestaña en la laguna del corazón.
- ❑ La tabla de rodadura está constituida por una superficie de rodadura inclinada 1/40, seguida de una parte inclinada 1/10, sobre unas longitudes de 37 y 27

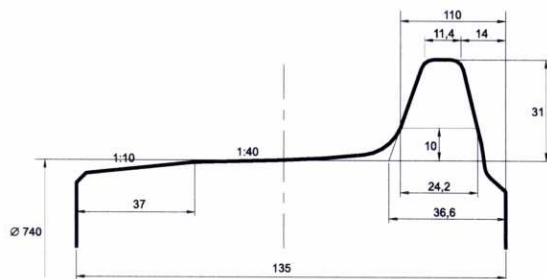


Figura 9.8: Perfil de llanta de Karlsruhe.

Fuente: [23].

mm respectivamente. Esta última disposición evita que sobre los carriles de garganta, la rueda pueda ponerse en contacto con el pavimento de la calzada (por ejemplo, a causa de un hundimiento de la vía) [29].

Con esta disposición se consigue que la llanta, estrecha como la de los tranvías, cumpla las condiciones normales para circulación tranviaria por la calle, pero la parte interna de la rueda, que es más ancha por encima del nivel de la superficie de la calle, contacte con el contracarril que está a una distancia suficiente para permitir el paso de las ruedas del ferrocarril pesado. Este hecho se ilustra en la figura 9.9 [21].

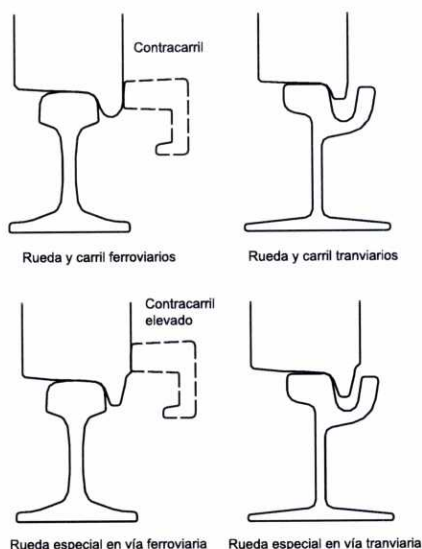


Figura 9.9: Uso de contracarriles elevados y llantas especiales de tranvitrén. Fuente: [21].

2.1.2. Saarbrücken

El Saarbahn (tranvitrén de Saarbrücken) difiere del caso de Karlsruhe en lo que se refiere al problema del perfil de llanta. En efecto, dado que el Saarbahn es un sistema de nueva creación, que no tiene que conectarse con vías tranviarias existentes, ha sido posible elegir un perfil de llanta de tipo ferroviario, conforme a las directivas de la VDV [2] relativas al guiado de ejes, lo que permite evitar el problema de compatibilidad con las infraestructuras de la DB, ya que la pestaña de la rueda es ancha (véase la figura 9.10) [24, 26].

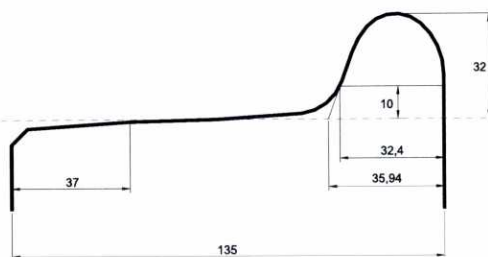


Figura 9.10: Perfil de llanta de Saarbrücken.

Así, en lugar de disponer en la zona urbana de carriles de garganta típicamente tranviarios, como el Ri 60, con garganta estrecha, se utilizaron carriles de garganta ancha, de manera que ya no es necesaria la utilización de perfiles de llanta especiales para la circulación mixta, sino que se utilizan perfiles de llanta ferroviarios convencionales [26].

De esta forma, la primera sección del trazado del Saarbahn se equipó con carriles de garganta ancha (Ph 37a), colocados sobre una losa de hormigón armado. La superestructura de la vía se completa con anclajes de tipo químico instalados cada 3 m en línea recta y cada 1,5 m en curvas cerradas [24].

En las zonas en las que el metro ligero circula en plataforma reservada, la vía se encastra en adoquines de hormigón, elevando entre 6 y 8 cm la plataforma con respecto a la calzada por la que circula el tráfico rodado. Por su parte, para los tramos con plataforma compartida, la vía va encastrada en la base bituminosa [24].

En cuanto a los tramos situados fuera de las zonas urbanizadas, como por ejemplo entre Saarbrücken y Riegelsberg, su superestructura es de tipo convencional, es decir, compuesta por carriles S49 colocados sobre traviesas de hormigón situadas sobre un lecho de balasto [24].

En la figura 9.11 se presentan los perfiles de los carriles a los que se hace referencia en este apartado.

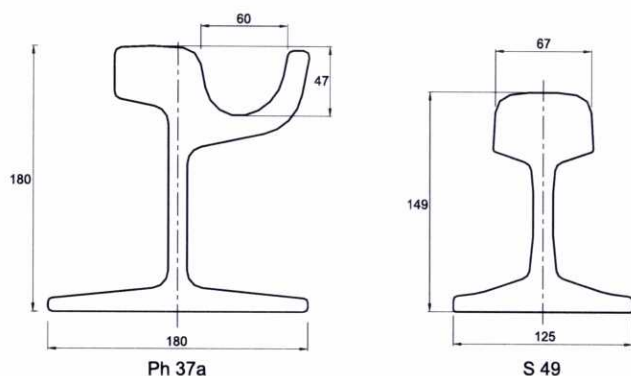


Figura 9.11: Perfiles de carril de Saarbrücken.

Fuente: [26].

2.1.3. Normativa alemana

Las recomendaciones de la VDV (*Verband Deutscher Verkehrsunternehmen*) para la operación de vehículos ferroviarios urbanos en explotación mixta conforme a BOStrab y EBO [2], establecen que, en relación con el dispositivo de guía - perfil de llanta, se deben diferenciar los siguientes casos:

- ☐ Caso de que la red tranviaria sea de nueva construcción:

En este caso, las recomendaciones de la VDV establecen que si se construye una nueva red tranviaria que ha de ser conectada a una red ferroviaria existente, es aconsejable utilizar, en la zona urbana, carriles de garganta para tráfico ferroviario convencional. Este tipo de carriles tienen una garganta con anchura y profundidad mayores que las de los carriles de garganta para circulación tranviaria, de manera que el perfil normal de rueda ferroviaria puede circular sobre ellos.

❑ Caso de red tranviaria ya existente:

Si ya existe una red tranviaria, y no se puede sustituir los carriles y adaptar los desvíos a un precio razonable, se distinguen los siguientes casos:

- Para una circulación ilimitada dentro de la red ferroviaria convencional, se deben cumplir las siguientes condiciones (véase la figura 9.12):
 - Ruedas de metro ligero con un diámetro de 740/660 mm.
 - Ancho de llanta: $e = 135$ mm.
 - Configuración de la cara interior de la rueda preparada para la circulación sobre corazones con contracarril que esté montado a una altura de 20 mm sobre el nivel superior del carril.
 - Bogies convencionales con dos ejes por lo menos.
 - Altura de la pestaña, $S_h \geq 30$ mm
 - Parámetro $q_R \geq 6,5$ mm (véase la figura 9.101 de este capítulo).
 - Distancia entre caras internas de las ruedas de 1 360 mm.

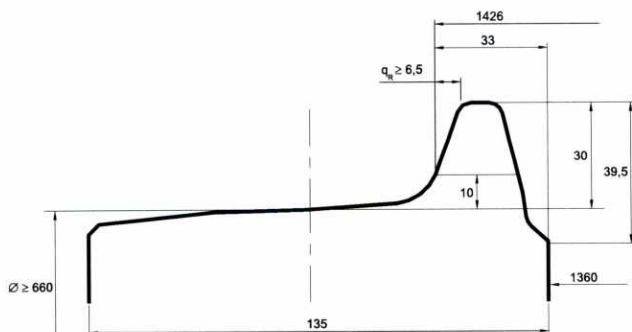


Figura 9.12: Perfil de llanta para circulación ilimitada sobre red ferroviaria. Fuente: [2].

Además, en la red tranviaria existente se deben cumplir las siguientes condiciones:

- La profundidad de garganta tiene que ser acorde con el perfil de la rueda (por regla general la altura de la pestaña más 1 o 2 mm).

2.2. GRAN BRETAÑA

La norma británica Railway Group Standard GM/RT-2452 [37] establece, en su apartado A.1.2, que se exige a los vehículos de tranvitrén del cumplimiento del apéndice A de la norma GM/RT-2026 titulada “*Ejes montados: seguridad en servicio y necesidades de mantenimiento*”. Sin embargo, cuando se proponga una geometría de ejes montados que no sea estándar (véase el apartado A.1.3 más abajo), se deberá realizar una evaluación del riesgo que incluirá la consideración de los ratios de desgaste, y se deberán establecer criterios dimensionales (como parte de las disposiciones de mantenimiento/revisión) para que no se excedan los límites de seguridad en servicio.

Con respecto al apartado A.1.3, citado anteriormente, exige a los vehículos de tranvitrén del cumplimiento de las secciones 5.5, 5.6, 6.3.3 y 10.3 de la norma GM/RT-2028 “*Diseño de ejes montados*”, y del apartado 5 de la norma GM/TT-0089 “*Interfaces geométricas entre los ejes montados ferroviarios y la vía*”. Sin embargo establece que cuando los requisitos de guiado, seguridad contra el descarrilamiento por remonte de la pestaña, o necesidad de limitar las tensiones de contacto entre rueda y carril en la infraestructura de otras administraciones, dicen que el uso de uno de los perfiles de rueda aprobados no es apropiado, o que los límites dimensionales que normalmente se aplican no son apropiados, se permitirá la utilización de diseños alternativos, siempre que se lleve a cabo una evaluación de riesgos adecuada. Esta evaluación de riesgos deberá tener en cuenta, como mínimo:

- ☐ la relación geométrica eje montado-vía en línea recta, y su influencia en el guiado en las curvas, en la dinámica del vehículo y su estabilidad, y en la predisposición al descarrilamiento;
- ☐ guiado de los ejes montados en las agujas y los cruzamientos, evitando impactos no deseados;
- ☐ el comportamiento de los ejes montados en presencia de contracarriles;
- ☐ la tensión de contacto rueda-carril.

Por su parte, la norma Railway Group Guidance Note GE/GN-8502 [38] establece, en su apartado 6.2 “*Condiciones sobre la geometría de los ejes montados y sobre la suspensión de los vehículos*”, que se permite, para el caso de los vehículos de tranvía, cierta flexibilidad en la elección del perfil de rueda y de la dimensión entre caras internas de las pestañas. Sin embargo, debido a esta flexibilidad, aparecen una serie de riesgos potenciales, por lo que se impone la necesidad de llevar a cabo un cuidadoso análisis del comportamiento de la interfaz rueda-carril antes de variar los parámetros establecidos en las normas GM/GR-2525 “*Manual sobre ejes montados*”, y GM/RT-2026 “*Seguridad en servicio y mantenimiento de ejes montados*”. Los riesgos potenciales que pueden aparecer son:

- ☐ La aparición de conicidad equivalente que puedan dar lugar a problemas de estabilidad dinámica cuando se circule sobre la infraestructura controlada por Railtrack.
- ☐ Excesivo desgaste de las ruedas y carriles en curvas, debido a una incompatibilidad en la geometría de los perfiles.
- ☐ La generación de tensiones de contacto rueda-carril excesivas.
- ☐ Guiado inadecuado en las agujas y los cruzamientos, y en otros elementos de la vía.
- ☐ Contactos accidentales con algunos componentes de la vía, tanto en vía normal como en las agujas y los cruzamientos.
- ☐ Aumento de la tendencia al descarrilamiento por remonte de la pestaña.
- ☐ Funcionamiento inadecuado en situaciones excepcionales del estado de la vía, por ejemplo cuando se circula sobre carriles rotos.

Si bien la normativa británica no establece ninguna otra especificación sobre el tema, sí se han realizado estudios más detallados en los documentos que han servido de base para la redacción de dicha normativa. Así, en el documento "*Estándares para compartir vías de metro ligero y ferrocarril convencional*", llevado a cabo por *British Rail Research* en junio de 1993 [6], se presenta una tabla (véanse la tabla 9.1 y la figura 9.15) para la elección de perfil de llanta en función del tipo de circulación mixta que se tenga. Para utilizar la tabla primero se deberán decidir las características del sistema de metro ligero en su conjunto, estableciendo si se va a tratar de un metro ligero en plataforma totalmente reservada (columna 1) o si va a haber algún tramo con circulación por la calle (columnas 2 y 3). En este último caso se debe decidir, también, si va a existir circulación rodando sobre la punta de la pestaña o no.

2.3. FRANCIA

Con respecto al caso francés, en el "*Etude sur l'analyse des contraintes d'infrastructure ferroviaire à prendre en compte dans le système tram-train*" [44] se propone el perfil que se muestra en la figura 9.16, con las aclaraciones que se detallan a continuación, en función de la numeración que aparece en la figura (tomadas literalmente del documento de referencia):

El perfil propuesto resulta de un compromiso entre las exigencias de rodadura respectivas de las redes urbanas y de la red ferroviaria nacional. En esta etapa del estudio, no se trata más que de un diseño inicial de una rueda nueva; por lo tanto, no figuran las tolerancias dimensionales, que deberán tener en cuenta la utilización generalizada de ruedas elásticas.

ra, al objeto de concordar con las ruedas del tranvitrén y así evitar los ascensos de las ruedas sobre los contracarriles:

- cruzamientos, aparatos de dilatación, corazones de travesía en carriles ensamblados: altura a regular sobre los itinerarios de la red ferroviaria nacional francesa recorridos por los tranvitrenes.
- corazones de travesía monobloque: corazones de fabricación especial en los que la altura del contracarril es de 60 mm con respecto al plano de rodadura a lo largo de toda su longitud, sobre los itinerarios de la red ferroviaria nacional recorridos por los tranvitrenes (en efecto, en los corazones actuales la altura del contracarril es nula en cada extremo, y se eleva progresivamente hasta 60 mm en el cuerpo del corazón).

Sin embargo, la circulación sobre las travesías (ángulo obtuso) sigue siendo un problema genérico⁽¹⁾ (existencia simultánea de lagunas sobre cada hilo de carril del itinerario sobre el que se circula) que hace necesario el respeto absoluto de las siguientes exigencias:

- Diámetro mínimo de la rueda del tranvitrén: 630 mm
 - Distancia entre caras internas de las pestañas ($Ei^{(2)}$): $1359 < Ei < 1363$ mm bajo carga o sin ella.
 - Distancia entre caras activas de las ruedas ($Ea^{(2)}$): $1415 < Ea < 1426$ mm bajo carga o sin ella.
 - Además, debe considerarse el conjunto de prescripciones de la ficha UIC 510 – 1 OR [47], tomando como dato una rueda de diámetro 440 mm (rueda tipo UIC equivalente a la rueda de tranvitrén propuesta, en lo que concierne a la distancia de guiado en las travesías).
5. Zona de inclinación 1/40 para preservar la estabilidad de rodadura de las ruedas del tranvitrén sobre la red ferroviaria nacional.

⁽¹⁾ Además de lo aquí indicado, el estudio francés contempla la necesidad de realizar ensayos complementarios sobre una travesía con tg 0,11, que confirmarán si la circulación con ruedas de tranvitrén puede efectuarse con toda seguridad.

⁽²⁾ Dado que se está haciendo una transcripción del estudio francés al que se hace referencia, se utiliza la notación del mismo, si bien ésta no coincide con la nomenclatura general de la presente Tesis.

6. Plano de rodadura.
7. Pendiente de la banda de rodadura 1/15 con acuerdo lateral exterior con la zona 5 a 1/40.
8. Radio de acuerdo con la pestaña establecido en 15 mm, a fin de evitar una superficie de contacto demasiado grande sobre los carriles urbanos, y así minimizar los chirridos en las curvas.
9. Parámetro q_R .

Según las normas de la red ferroviaria nacional francesa, esta cota q_R debe ser siempre superior a 6,5 mm, valor a partir del cual existe riesgo de descarrilamiento en los aparatos de vía. Las normas de mantenimiento están fijadas en consecuencia (reperfilado obligatorio de la rueda cuando exista riesgo de que se alcance este límite).

Tal y como se ha concebido, la rueda propuesta presenta un q_R de 9,31 mm cuando está nueva, valor que se considera aceptable (el q_R de una rueda nueva de un vehículo de la SNCF está en el entorno de 11 mm).

10. Radio de acuerdo de la pestaña: 11,5 mm.
11. Ancho de la parte cilíndrica de la zona superior de la pestaña de 4,6 mm, al objeto de permitir la circulación de la rueda sobre dicha parte superior en las zonas de vía de la red urbana con poca profundidad de garganta (cruzamientos, etc.).
12. Radio del lateral interior de la parte superior de la pestaña de 2 mm (limitación de circulación sobre las vías urbanas) y acuerdo de 10 mm.
13. Altura de la pestaña de 31 mm, lo que asegura un funcionamiento correcto de los detectores electrónicos y electromagnéticos sobre la red ferroviaria nacional francesa (la altura de la pestaña debe estar comprendida entre 28 y 36 mm).

3. POSIBLES SOLUCIONES PARA LOS PERFILES DE RUEDA Y CARRIL EN EL CASO FEVE

Como se ha comentado anteriormente, existen dos posibles escenarios a la hora de plantear soluciones a los problemas relacionados con el perfil de llanta, que son el caso de sistema tranviario de primera implantación, y el caso de sistema tranviario existente. Estos dos escenarios se presentarán a continuación.

3.1. CASO DE SISTEMA TRANVIARIO DE PRIMERA IMPLANTACIÓN

En este caso, como ya se ha explicado, se puede adoptar la filosofía de solucionar el problema en la vía, en lugar de en el vehículo, de manera que se utilicen, en el diseño del tramo tranviario, carriles ferroviarios que hagan posible la circulación de llantas ferroviarias sobre los mismos. En este caso, o bien se utiliza un carril de garganta, o bien se realiza en la calle una huella para permitir el paso de las pestañas por la misma. La solución más corriente es la de utilizar un carril de garganta, que en este caso deberá tener la garganta ancha, de manera que puedan circular sobre él los perfiles de rueda ferroviarios convencionales, de pestaña ancha.

Se plantea entonces la discusión sobre si se deben disponer estos carriles verticales o inclinados, ya que cada una de las dos opciones tiene diferentes ventajas e inconvenientes.

Por otra parte, esta solución tiene el inconveniente de que, al utilizar carriles con garganta ancha en las vías tranviarias, los tramos en que se comparta la plataforma con el resto de la circulación rodada supondrán mayores inconvenientes para los demás usuarios de las calles, al existir un evidente riesgo de que bicicletas, ciclomotores, motos, o incluso peatones, puedan caer debido a la presencia de la pestaña. Este problema se deberá valorar para cada caso concreto, en función de las zonas que se atraviesen, del uso de bicicletas, etc., pero en principio no parece que sea suficiente como para que no se pueda aplicar esta solución, que evita actuaciones puntuales en los aparatos de vía existentes, y permite la utilización de perfiles de llanta ampliamente contrastados y utilizados en la actualidad.

La problemática relacionada con este caso de sistema tranviario de nueva implantación, y las posibles soluciones a adoptar, se estudiarán en el apartado 8 de este capítulo.

3.2. CASO DE SISTEMA TRANVIARIO EXISTENTE

En el caso de que el sistema tranviario ya exista, habrá que buscar, como se ha comentado anteriormente, una solución para paliar, en la medida de lo posible, los efectos derivados del diferente comportamiento de los vehículos al circular por vías con diferente asentamiento (diferente carril e inclinación).

Estos efectos pueden ser desgastes localizados y alteraciones en el movimiento de los vehículos que pueden llegar a comprometer su estabilidad, produciéndose su descarrilamiento.

Es por ello que se deberá estudiar la dinámica para un caso tan particular como este, tratando de desarrollar una metodología para la definición de un perfil de llanta optimizado para este tipo de circulación. El desarrollo de dicha metodología es el objeto principal de este capítulo.

4. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DEL PERFIL DE LLANTA OPTIMIZADO

Para la obtención de un perfil de llanta optimizado para circulación sobre vías ferroviarias y tranviarias por parte de los vehículos de tranvitrén se deberán analizar los principales parámetros que caracterizan el movimiento de un vehículo ferroviario. Para ello es preciso desarrollar un modelo matemático que simule el comportamiento del vehículo en cuestión. En la presente Tesis se ha utilizado, para dicha simulación, el programa GENSYS de dinámica ferroviaria.

Como datos de entrada para dicho programa será necesario introducir, por una parte, los necesarios para caracterizar las vías que se van a considerar (en lo que se refiere a trazados, estructura de la vía, etc.), y por otra, datos acerca del vehículo cuyos perfiles de llanta se pretende optimizar (en lo que se refiere a las suspensiones, la geometría, etc.).

Una vez que se tienen los datos necesarios para la realización de las simulaciones dinámicas, se procede a la ejecución de las mismas con el programa de dinámica vehicular, de manera que se obtendrán resultados que caracterizarán la circulación del vehículo de tranvitrén sobre los tipos de vía considerados. Con el fin de poder desarrollar un perfil de llanta adecuado para la circulación ferroviaria y tranviaria, se ha considerado que los parámetros más importantes a obtener como resultado del análisis dinámico del movimiento del vehículo son los siguientes:

- ☐ Riesgo de descarrilamiento por remonte de la pestaña.
- ☐ Desgaste.
- ☐ Tensiones de contacto rueda-carril.

Es importante destacar que, como se vio en el apartado 2.1.4, la normativa británica establece que cuando se desarrolle un nuevo perfil de llanta para su utilización por los vehículos de tranvitrén, se debe prestar atención especial a ciertos riesgos potenciales, entre los que incluye estos tres parámetros. Además de estos riesgos se incluyen otros (especificados en dicho apartado), que también se comprobarán a lo largo del proceso de obtención de la llanta optimizada.

Estos parámetros se considerarán a través de índices que determinarán cómo de bueno es cada perfil de llanta con respecto a los mismos. Una vez que se conoce la bondad de un determinado perfil de llanta, se pueden realizar modificaciones al mismo, y estudiar cómo varían los parámetros considerados, de manera que se ve si con esas modificaciones se mejora o empeora el perfil. Si se realiza este estudio sobre un número suficientemente grande de perfiles de llanta, al final se podrá determinar cuál de ellos es el mejor, y éste sería el perfil optimizado que se busca. Sin embargo, realizar este proceso manualmente sería

poco eficiente, por lo que se ha utilizado un Algoritmo Genético (AG), cuyo funcionamiento se explicará en otros apartados de este capítulo.

Así, alimentando al AG con los resultados de las simulaciones realizadas en GENSYS, éste proporcionará unos nuevos perfiles de llanta, que se introducirán de nuevo como datos del vehículo para nuevas simulaciones, repitiendo este proceso hasta que se llegue a la convergencia.

Esta metodología de optimización se puede ver esquematizada en la figura 9.17, y se explicará más detalladamente en los siguientes apartados de este capítulo.

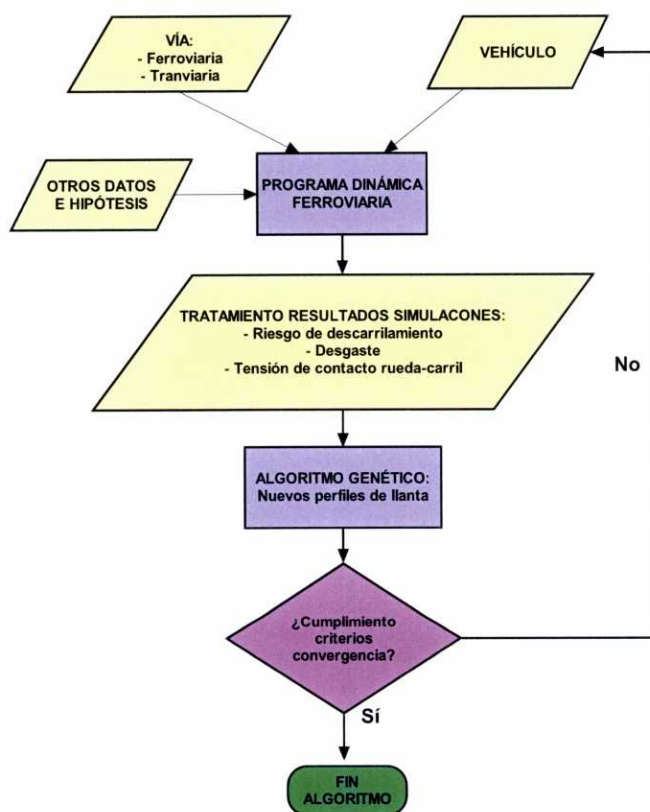


Figura 9.17: Diagrama de flujo de la metodología de optimización del perfil de llanta.

4.1. CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN CONSIDERADOS

Antes de pasar a explicar la metodología de optimización se expondrán, en este apartado, los índices que se han considerado para dicha optimización. Los índices están relacionados con los parámetros a los que se hacía referencia anteriormente (tendencia al descarrilamiento, desgaste y tensiones de contacto rueda carril).

4.1.1. Riesgo de descarrilamiento (I_{YQ})

Para estudiar la tendencia al descarrilamiento de los perfiles de llanta que se estudian se utiliza el I_{YQ} , que es función de la relación entre la fuerza lateral y la fuerza vertical actuantes en el punto de contacto rueda-carril.

Cuando un vehículo ferroviario circula por una curva de radio suficientemente pequeño, se puede dar el caso de que la diferencia de radios de rodadura que se produce entre la rueda exterior e interior del eje al desplazarse transversalmente a la vía no sea suficiente para absorber la diferencia de longitud que tienen que recorrer dichas ruedas sobre sus respectivos carriles. En este caso, aparece una fuerza de elevación, causada por el ángulo de ataque y la fuerza lateral, que presiona la pestaña contra el carril. Cuanto mayor es la presión entre la pestaña y el carril exterior, mayor será la fuerza de elevación.

Si se consideran los sistemas de fuerzas presentados en las figuras 9.18 y 9.19, se pueden establecer las siguientes relaciones:

$$Y_l = N_l \cdot \sin \gamma_l + F_{\eta l} \cdot \cos \gamma_l \quad [9.1]$$

$$Q_l = N_l \cdot \cos \gamma_l - F_{\eta l} \cdot \sin \gamma_l \quad [9.2]$$

$$Y_r = N_r \cdot \sin \gamma_r - F_{\eta r} \cdot \cos \gamma_r \quad [9.3]$$

$$Q_r = N_r \cdot \cos \gamma_r + F_{\eta r} \cdot \sin \gamma_r \quad [9.4]$$

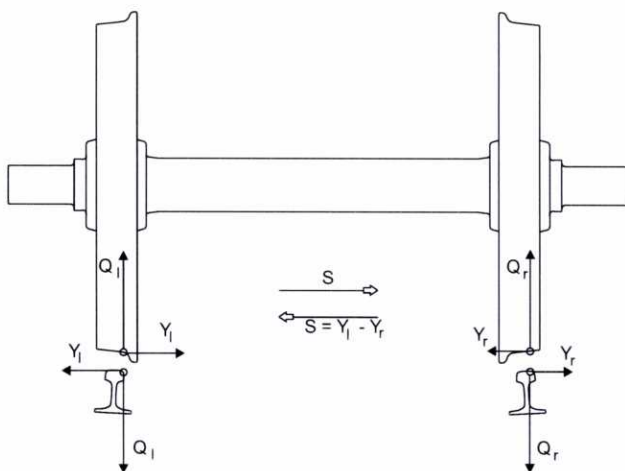


Figura 9.18: Fuerzas de contacto rueda-carril sobre ejes de coordenadas generales. Fuente[1].

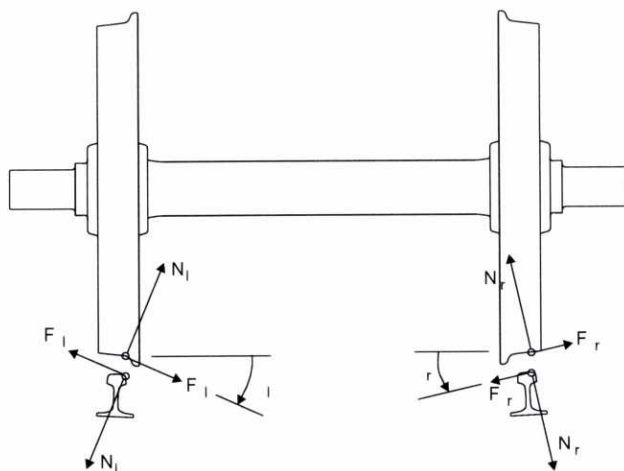


Figura 9.19: Fuerzas de contacto rueda-carril sobre ejes de coordenadas locales del contacto. Fuente: [1].

Asumiendo ahora un ángulo de ataque bastante grande ($\alpha \geq 0,5^\circ$), de tal manera que la fuerza de elevación apunta prácticamente hacia arriba, se obtiene la figura 9.20.

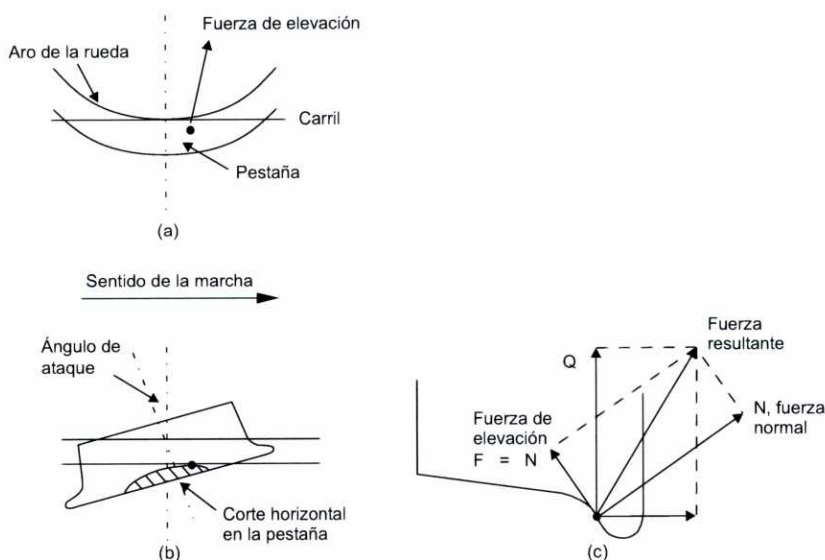


Figura 9.20: Fuerzas al comienzo del remonte de la pestaña, según Nadal. Fuente: [1].

Independientemente de si se está estudiando la rueda derecha o la izquierda, estas fuerzas límite sustituidas en las expresiones anteriores, y teniendo en cuenta que $\gamma = \beta$, dan lugar a:

$$Y = N \cdot \sin \beta - \mu \cdot N \cdot \cos \beta \quad [9.5]$$

$$Q = N \cdot \cos \beta + \mu \cdot N \cdot \sin \beta \quad [9.6]$$

Y dividiendo las dos ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación de Nadal:

$$\left(\frac{Y}{Q}\right)_{\text{Nadal}} = \frac{\tan \beta - \mu}{1 + \mu \cdot \tan \beta} \quad [9.7]$$

En la práctica, se debe cumplir que:

$$\frac{Y}{Q} \leq \left(\frac{Y}{Q}\right)_{\text{lim}} \quad [9.8]$$

Siendo el valor de $(Y/Q)_{\text{lim}}$ igual a 0,8 para radios mayores de 250 m, según la norma UIC 518 [49]. De acuerdo con CEN [9] y con la UIC 518, el valor de Y/Q a considerar debe ser aquel que se produzca sobre tramos mayores de 2 m, es decir, $[(Y/Q)_{2m}]_{\text{lim}}$. El hecho de utilizar un filtrado de Y/Q en tramos de 2 m de longitud se debe a que se necesita cierta longitud de circulación para que la rueda remonte la cabeza del carril y acabe descarrilando.

Para ver en qué ruedas se debe realizar la comparación, se debe tener en cuenta que desde el punto de vista del descarrilamiento por remonte de pestaña, la situación más desfavorable es aquella en la que el giro en una rueda y el deslizamiento en la opuesta de un eje montado no es suficiente para girar dicho eje, dirigiéndolo por el interior de la curva. En este caso es, normalmente, el primer eje montado de cada bogie el que circula en una posición de giro insuficiente, sobre todo en los bogies especialmente rígidos con un empuje bastante grande, circulando por curvas cerradas.

Es por ello que se estudian los cocientes Y/Q relativos a las ruedas izquierdas (exteriores para los radios de curvas establecidos, que corresponden con curvas a derechas) del primer eje montado de cada bogie (primer y segundo bogie), denominados $Y/Q11(x)$ (rueda izquierda del primer eje del primer bogie de la primera, y única, caja) e $Y/Q21(x)$ (rueda izquierda del primer eje del segundo bogie de la primera, y única, caja), siendo x la posición del vehículo sobre la vía.

Las operaciones previas a la comparación consisten en el filtrado del valor medio de las variables $Y/Q11(x)$ e $Y/Q21(x)$ en tramos de 2 m de longitud, obteniéndose así las variables $Y/Q11.2m(x)$ e $Y/Q21.2m(x)$, sobre las que se aplicará un tratamiento estadístico para obtener los valores máximos de dichas variables, que se almacenan en $Y/Q11.2mMAX$ e $Y/Q21.2mMAX$. Finalmente se almacena el máximo valor de estas dos variables en la variable YQ_{max} , que se divide después por 0,8 (que como ya se ha comentado es el valor límite de acuerdo con las normas CEN y UIC 518) para obtener la variable Factor_{YQ} . En función del valor obtenido de Factor_{YQ} , se obtendrá el valor del índice I_{YQ} , por medio de la curva de interpolación que se presenta en la figura 9.21.

Como se puede observar en dicha curva, para los valores normales de Y/Q (entre 0,4 y 0,9) se establece que el valor del índice I_{YQ} aumentará linealmente entre 0 y 2, es decir, con valores razonables de mayoración. Para valores de Factor $_{YQ}$ menores de 0,4, dado que el valor de Y/Q se mantiene muy bajo en relación al límite de Nadal, se le da un valor de penalización nulo. Para valores por encima de 0,9 (es decir, valores cercanos al valor límite) se aumenta rápidamente el índice, de tal manera que cuando se alcance un valor de Factor $_{YQ}$ de 1, es decir, cuando el valor de Y/Q alcance el límite de Nadal, se le asignará a ese perfil de llanta un I_{YQ} de 100, por lo que el valor final del Índice Total de ese perfil de llanta será muy alto (perfil muy malo), y por tanto será desechado.

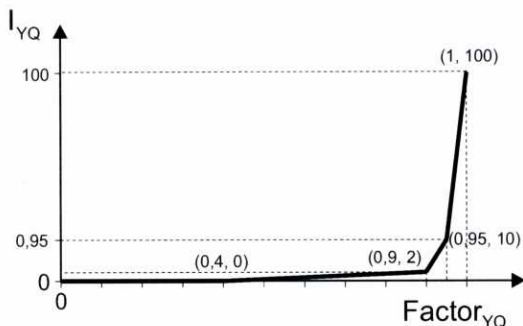


Figura 9.21: Curva de interpolación del índice I_{YQ} .

4.1.2. Desgaste (I_{Desgaste})

El desgaste es el fenómeno que más interesa a la hora de desarrollar un perfil de llanta adaptado a la circulación mixta sobre vías ferroviarias y tranviarias, debido a que la circulación de un mismo vehículo sobre vías de características diferentes podría dar lugar a fenómenos de desgastes localizados en ruedas o carriles. Es por ello que este índice tendrá una ponderación cuatro veces superior a la de los demás índices que se consideran en la metodología de optimización que se presenta en esta Tesis.

Para la determinación del valor del I_{Desgaste} , se considera la disipación de energía de desgaste (es decir, la pérdida de energía por metro de distancia recorrida) que se produce en cada una de las ocho ruedas del vehículo, asumiendo que el desgaste en la rueda es directamente proporcional a dicha disipación, a pesar de que esto no es estrictamente cierto. De esta forma, se considera que la disipación de energía de desgaste dará una buena indicación de la bondad o adaptación del perfil de llanta estudiado en relación con el desgaste que se va a producir en él.

Para la obtención de la disipación de energía de desgaste, se calculan, por una parte, los productos de las fuerzas transversal y longitudinal de pseudodeslizamiento por los pseudodeslizamientos respectivos, tanto en la banda de rodadura⁽¹⁾ de la rueda como en la pestaña (en caso de que exista contacto en la pesta-

⁽¹⁾ En esta Tesis se denominará banda de rodadura de la rueda a la zona en torno al círculo de rodadura, de forma sensiblemente troncocónica. De esta forma, la geometría de la llanta de la rueda estará formada por la banda de rodadura y la pestaña.